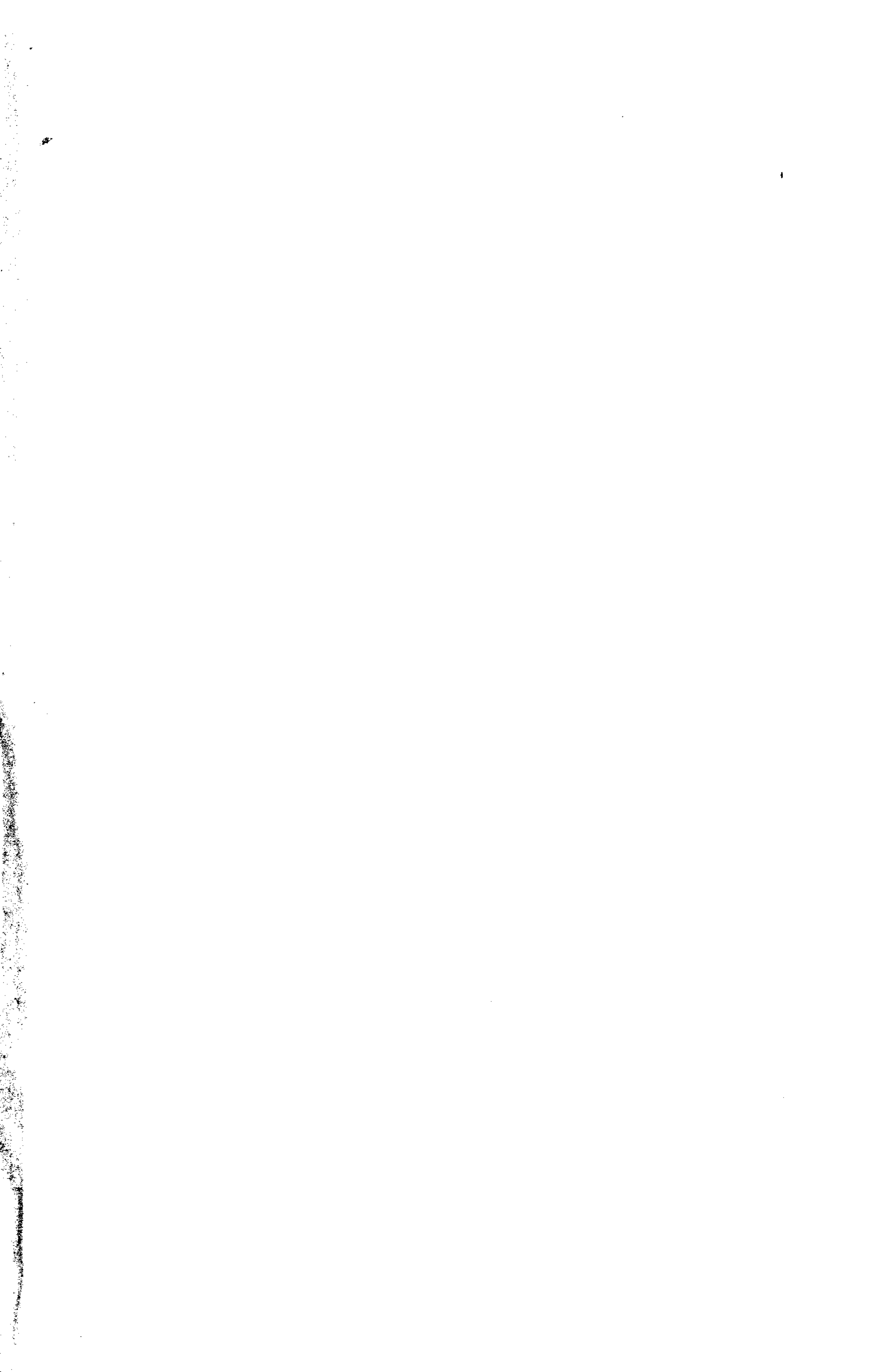
الجزء الرابع

الترتيب



الباب الرابع والعشرون

تكوين المتسلسلات

١٨٧ – فكرة الترتيب أو المتسلسلة من الأفكار التى سبق أن تعرضنا لها فى معرض الكلام عن المسافة ، وعن ترتيب المقدار . فقد كشف البحث فى الاتصال ، وهو البحث الذى أجريناه فى الباب الأخير من الجزء الثالث ، عن أنه فكرة الأجدر أن تكون ترتيبية ، ومهد الأذهان للأهمية الأساسية لفكرة الترتيب . وقد حان الوقت الآن لفحص هذه الفكرة فى ذاتها . فقد زادت التطورات الحديثة من أهمية الترتيب من الوجهة الرياضية البحتة زيادة لا يمكن المبالغة فى وصفها . وقد أثبت كل من ديديكند وكانتور وبيانو كيف يؤسس الحساب والتحليل على متسلسلة من نوع خاص – أى على خواص الأعداد المتناهية والتى بفضلها يتكون ما سأسميه متوالية rogressi . وسنرى أيضا أن الأعداد اللامنطقة تعرف تعريفا تامًّا باستخدام الترتيب ، وأن فصلا جديدا من الأعداد الترتيبية المتصاعدة transfinite قد أدخل ، وأمكن بفضله الحصول على نتائج فى غاية الأهمية والطرافة . وفى مجال الهندسة نجد أن طريقة شتاوت Staudt لرسم الشكل الرباعى التام ، وبحوث بييرى Pieri فى الهندسة الإسقاطية قد بينت كيف تجرى النقط والخطوط والسطوح المستوية فى ترتيب مستقل عن الاعتبارات القياسية وعن المقدار . وذلك على حين نجد أن الهندسة الوصفية تثبت أن قسطا كبيراً من الهندسة لا يتطلب غير احتمال وجود الترتيب المتسلسل . هذا فضلا عن أن فلسفة المكان والزمان بأسرها تتوقف على وجهة النظر التى نسلم بها عن الترتيب . ومن أجل ذلك أصبح البحث فى الترتيب جوهريًّا فى فهم أسس الرياضيات ، وهو بحث أغفلته الفلسفات الجارية .

١٨٨ – وتبلغ فكرة الترتيب من التعقيد مبلغاً أكثر من أى فكرة أخرى سبق لنا تحليلها . فلا يمكن لحدين أن يكون لهما ترتيب ، بل ولا لثلاثة حدود أن يكون لها ترتيب دورى . ومن أجل هذا التعقيد واجه التحليل المنطقى للترتيب صعوبات

كبيرة ، ولذلك سأتناول هذا الموضوع تدريجياً . فأبحث فى هذا الباب الظروف التى ينشأ فيها الترتيب ، مرجئاً البحث فى ماهية الترتيب إلى الباب التالى . وسيثير هذا التحليل عدة مسائل أساسية فى المنطق العام تتطلب بحثاً ضافياً ذا صفة تكاد أن تكون فلسفية بحتة . وعند ذلك أنتقل إلى موضوعات ذات صلة أكثر بالرياضة ، مثل أصناف المتسلسلات والتعريف الترتيبي للأعداد ، وبذلك نمهد السبيل شيئا فشيئا للبحث فى اللانهاية والاتصال فى الجزء التالى .

هناك طريقتان مختلفتان يمكن أن ينشأ بهما الترتيب ، ولو أننا سنجد فى نهاية الأمر أن الطريقة الثانية يمكن أن ترد إلى الأولى . فى الطريقة الأولى يتكون ما يمكن أن نسميه بالعنصر الترتيبي من حدود ثلاثة ا ، ب ، حـ يقع أحدهما (ب مثلا) بين الحدين الآخرين. وهذا يحدث دائما عندما تقوم علاقة «بين» Between ا ، ب وبين ب ، حـ لاتقوم بين ب ، ا ، أو بين حـ ، ب ، أو بين حـ ، ا . وهذا هو التعريف أو بالأحرى هذا هو الشرط اللازم والكافى للقضية « ب بين ا ، حـ » . ولكن هناك حالات أخرى من الترتيب لا تتحقق فيها الشروط السابقة لأول وهلة ، ولا تنطبق عليها فيما يظهر لفظة « بين » . وهذه الحالات فيها حدود أربعة ا ، ب ، حـ ، ء هى العنصر الترتيبي ، ويمكن أن نقول عنها إن ا ، حـ مفصولان بالحدين ب ، ء . وهذه العلاقة أعقد ولكن يمكن وصفها كالآتى : يقال إن ا ، حـ مفصولان عن ب ، ء عندما تقوم علاقة لا تماثلية بين ا ، ب ؛ ب ، حـ ؛ حـ ، ء . أو بين ا ، ء ؛ ء ، حـ ؛ حـ ، ب ؛ أو بين حـ ، ء ؛ ء ، ا ؛ ا ، ب . وفيما يختص بالحالة الأولى يجب أن تقوم نفس العلاقة إما بين ء ، ا أو بين كل من ا ، حـ ؛ ا ، ء . ويقال مثل ذلك عن الحالتين الأخريين[1] (ولا نحتاج إلى فرض خاص عن العلاقة بين ا ، حـ أو بين ب ، ء . وفقدان هذا الشرط هو الذى يمنعنا من رد هذه الحالة إلى الحالة الأولى بطريقة بسيطة) . وهناك حالات ، أهمها الحالات التى تكون فيها المتسلسلات مقفلة ، يظهر فيها أن رد الحالة الثانية إلى الأولى مستحيل صوريا ، ولو أن هذا المظهر خداع كما سنرى فى شطر منه . وسنوضح فى هذا الباب الطرق الرئيسية التى تنشأ بها المتسلسلات عن

---

(١) وهذا يعطى شرطاً كافياً ولكنه غير ضرورى للفصل بين الأزواج .

مجموعات من مثل هذه العناصر الترتيبية .

ومع أن حدين فقط لا يمكن أن يكون لهما ترتيب فلا ينبغى أن نفترض أن الترتيب ممكن ، إلا عندما تقوم علاقات بين حدين . فى جميع المتسلسلات سنجد أن هناك علاقات لا تماثلية بين حدين . ولكن العلاقة اللاتماثلية التى لا توجد منها سوى حالة واحدة ، لا تكوّن ترتيباً . إذ يلزمنا على الأقل حالتان لعلاقة « بين » وثلاث حالات على الأقل للفصل بين الزوجين . وعلى ذلك فمع أن الترتيب علاقة بين ثلاثة حدود أو أربعة ، فهو ممكن فقط عندما تكون هناك علاقات أخرى قائمة بين أزواج الحدود . وهذه العلاقات قد تكون من أنواع شتى وتؤدى إلى طرق مختلفة لتوليد المتسلسلات . وسأسرد الآن الطرق الرئيسية التى أعرفها .

١٨٩ – (١) أسهل طريقة لتكوين المتسلسلات هى الآتية : لتكن لدينا مجموعة من الحدود متناهية أو لامتناهية ، كل حد فيها (مع احتمال استثناء حد واحد) له مع حد واحد لا غير من حدود المجموعة علاقة لاتماثلية معينة (ويجب بطبيعة الحال أن تكون غير متعدية) . وأن كل حد (ومرة ثانية مع احتمال استثناء حد واحد يجب ألا يكون هو الحد الذى استثنيناه فى المرة السابقة) له أيضاً مع حد واحد لا غير من حدود المجموعة علاقة هى عكس العلاقة الأولى[1] . ثم لنفرض أنه إذا كان للحد ا مع الحد ب العلاقة الأولى مع حـ ، فإن حـ لا يكون له العلاقة الأولى مع ا ، وعندئذ يكون لكل حد من حدود المجموعة فيما عدا الحدين المستثنين علاقة واحدة مع حد ثان ، والعلاقة العكسية مع حد ثالث ، بينما هذان الحدان لا تقوم بينهما أى من العلاقتين المذكورتين . ويترتب على ذلك أنه بتعريف « بين » يكون حدنا الأول بين حدينا الثانى والثالث .

والحد الذى له مع حد معلوم إحدى العلاقتين المشار إليهما يسمى المابعد next after الحد المعلوم ، والذى له مع الحد المعلوم العلاقة العكسية يسمى الماقبل next before الحد المعلوم . وإذا قامت العلاقتان المشار إليهما بين حدين سميا متعاقبين . أما الحدان الاستثنائيان إن وُجِدا فلايقعان بين أى زوج من الحدود ،

---

(١) عكس العلاقة هى العلاقة التى يجب أن تقوم بين ص ، س عندما تقوم العلاقة المعلومة بين س ، ص .

ويسميان بطرفى المتسلسلة ، أو يسمى أحدهما الأول والثانى الآخر . ولا يستلزم وجود أحد هذين الحدين بالضرورة وجود الآخر ؛ فمثلا الأعداد الطبيعية لها أول وليس لها آخر — وليس من الضرورى أن يوجد أيهما — مثال ذلك أن الأعداد الصحيحة الموجبة والسالبة مأخوذةً معاً فليس لها أول ولا آخر [١] .

وقد نوضح الطريقة السابقة بوضعها فى قالب صورى : إذا رمزنا لإحدى علاقاتنا بالرمز ع ، ولعكسها بالرمز عَ [٢] ؛ وإذا كان هـ أى حد من حدود مجموعتنا ، فإنه يوجد حدان ء ، ف بحيث يكون هـ عَ ء ، هـ ع ف ، أى بحيث يكون ء ع ف ، هـ ع ف . ولما كان لكل حد العلاقة عَ مع حد واحد فقط فلن نحصل على ء ع ف . وقد سبق أن افترضنا منذ البداية أننا لن نحصل على ف ع ء ، وعلى ذلك تقع هـ بين ء ، ف [٣] . وإذا كان ا حدًّا ليست له إلا العلاقة ع ، فمن الواضح أن ا ليست بين أى زوج من الحدود . ويمكن تعميم فكرة « بين » بتعريفنا أنه إذا كان حـ بين ب ، ء ، وكان ء بين حـ ، هـ ، قيل عندئذ إن حـ أو ء يقع كذلك بين ب ، هـ . وبهذه الطريقة ما لم نصل إلى أحد طرفى المتسلسلة أو نرجع إلى الحد الذى بدأنا منه ، فسنجد أى عدد من الحدود يقع الحد حـ بينها وبين ب . ولكن إذا كان المجموع الكلى للحدود لا يقل عن سبعة فلا نستطيع بهذه الطريقة أن نبين أى حد من ثلاثة لا بد أن يكون أحدها بين الاثنين الآخرين ، ما دامت المجموعة قد تتكون من متسلسلتين متميزتين إحداهما على الأقل — فى حالة المجموعة المتناهية — لا بد أن تكون مقفلة حتى نتحاشى وجود أكثر من طرفين .

ومن هذا يتضح أنه إذا أريد أن تؤدى الطريقة السابقة إلى متسلسلة واحدة ينتمى إليها أى حد من المجموعة ، فإننا نحتاج إلى شرط آخر يمكن التعبير عنه بقولنا : إن المجموعة يجب أن تكون « متصلة » . وسنضع طريقة فيما بعد لصياغة هذا الشرط دون إشارة إلى العدد ، ولكن فى الوقت الحاضر سنكتفى بالقول بأن المجموعة تكون متصلة متى توافر الشرط الآتى : إذا أعطينا أى حدين من حدود المجموعة ، فهناك عدد متناه معين (وليس بالضرورة فريداً) من الخطوات من حد

---

(١) الطريقة المذكورة هى الطريقة الوحيدة لتكوين المتسلسلات حسب بولزانو Bolzano "Paradoxien des Unendlichen" § 7.

(٢) هذه هى العلامة التى أخذ بها شرودر.

(٣) رفض د ع ف إنما يكون ضرورياً بالنسبة لهذه الطريقة الخاصة ، ولكن رفض ف ع د ضرورى لتعريف « بين » .

إلى التالى له ننتقل بها من أحد الحدين إلى الآخر . فإذا تحقق هذا الشرط أصبحنا واثقين أنّ أحد أى ثلاثة حدود فى المجموعة يقع بين الحدين الآخرين .

فإذا افترضنا الآن أن المجموعة متصلة وتكوّن عندئذ متسلسلةً واحدة، فقد ينشأ عن ذلك أربع حالات : (ا) قد يكون للمتسلسلة طرفان ، (ب) وقد يكون لها طرف واحد ، (حـ) وقد لا يكون لها طرف وتكون مفتوحة ، (د) وقد لا يكون لها طرف وتكون مُقْفَلة . وفى الحالة (ا) ينبغى ملاحظة أن المتسلسلة لا بد أن تكون متناهية ، لأننا إذا أخذنا الطرفين ، وكانت المتسلسلة متصلة ، فهناك عددٌ معين متناه من الخطوات ن ينقلنا من أحد الطرفين إلى الآخر ، وبذلك يكون عدد حدود المجموعة هو ن + ١ ، ويقع كل حد ما عدا الطرفين بينهما ، ولا يقع أى طرف منهما بين أى زوج آخر من الحدود . أما فى الحالة (ب) من جهة أخرى ، فلا بد أن تكون المجموعة لا متناهية . وهذا صحيح حتى لو لم تكن المجموعة متصلة .

ولبيان ذلك نفترض أن للطرف الموجود العلاقة ع ، ولكن ليس له العلاقة عَ ، عندئذ يكون لكل حد آخر من المجموعة كلا العلاقتين ، ولا يمكن أبدا أن يكون له العلاقتان معاً مع نفس الحد ، ما دامت ع لا تماثلية . وإذن فالحد الذى له مع الحد هـ (مثلا) العلاقة ع ، ليس هو الحد الذى له معه العلاقة عَ ، بل هو إما حدٌ ما جديد، وإما أحد الحدود السابقة على الحد هـ . ولا يمكن أن يكون هذا الحد هو الطرف ا ، لأن ا لا يمكن أن يكون له العلاقة عَ مع أى حد . وكذلك لا يمكن أن يكون حدا يمكن الوصول إليه بخطوات متتالية من ا دون المرور بالحد هـ ، إذ لو كان الأمر كذلك لكان لهذا الحد سابقان ، وهو خلاف الفرض بأن ع علاقة واحد بواحد . وعلى ذلك إذا كان ك حداً مّا يمكن الوصول إليه من ا بخطوات متتالية ، فيجب أن يكون له تالٍ ليس هو ا أو أى حد من الحدود بين ا ، ك . وعلى ذلك فالمجموعة لا نهائية ، متصلةً كانت أو غير متصلة . وكذلك فى الحالة (حـ) يجب أن تكون المجموعة لا نهائية ، لأن المتسلسلة فرضاً مفتوحة ، أى أننا إذا بدأنا من هـ ، فأى عدد من الخطوات نتخذه فى أى اتجاه من الاتجاهين لا يعود بنا مرة ثانية إلى هـ ، ولا يمكن أن توجد نهاية محدودة لعدد الخطوات الممكنة ، وإلا كان للمتسلسلة طرف . ولا يلزم فى هذه الحالة أيضا أن تكون المتسلسلة

متصلة . وعلى العكس من ذلك فى الحالة (د) يجب أن نفترض الاتصال . والقول بأن المتسلسلة مقفلة معناه أننا إذا بدأنا بحدٍّ مَّا ا ، واجتزنا عدداً من الخطوات ن نرجع مرة أخرى إلى ا . وفى هذه الحالة ن هى عدد الحدود ، وسيان عندنا أن نبدأ من أى حد . وفى هذه الحالة لا تكون « بين » معينة ، إلا حيث يوجد ثلاثة حدود متعاقبة ، وتشتمل المتسلسلة على أكثر من ثلاثة حدود . وبغير ذلك نحتاج إلى علاقة أعقد هى الانفصال .

١٩٠ — (٢) رأينا كيف أن الطريقة السابقة تؤدى إما إلى متسلسلات مفتوحة أو مقفلة ، بشرط أن تكون حدودها متعاقبة . أما الطريقة الثانية التى سنناقشها الآن فإنها تعطى متسلسلات ليس فيها حدود متعاقبة ، ولكنها لا تعطى متسلسلات مقفلة[١] . وتستخدم فى هذه الطريقة علاقة متعدية لا تماثلية ق ، ومجموعة من الحدود تقوم بين كل حدين منها ، إما العلاقة س ق ص ، أو ص ق س . وعندما تتحقق هذه الشروط تكون الحدود بالضرورة متسلسلةً واحدة . ولما كانت العلاقة لا تماثلية فإنه يمكن التمييز بين س ق ص ، ص ق س ، ولا يمكن أن يجتمعا معاً[٢] . وما دامت ق متعدية ، فإن س قَ ص ، ص ق ط تؤديان إلى س ق ط وينتج من هذا أن قَ هى أيضاً لا متماثلة ومتعدية[٣] . وهكذا فبالنسبة لأى حد س من المجموعة تقع جميع الحدود الأخرى من المجموعة فى فصلين ، تلك التى لها العلاقة س ق ص ، وتلك التى لها العلاقة ط ق س . وإذا رمزنا لهذين الفصلين بالرمزين $\breve{\Pi}$ س ، Π س ، على الترتيب ، رأينا أنه نظراً لتعدى ق إذا كانت ص تابعة

---

(١) الطريقة الآتية هى الطريقة الوحيدة التى يشرحها فيفانتى والمذكورة فى كتاب Vivanti in the *Formulaire de Mathématique*, (1895), VI, § 2, No 7. also by Gilman "On the properties of a one-dimensal manifold". *Mind* N. S. Vol 1.

وسنجد أن هذه الطريقة عامة بمعنى لا نجده فى أى طريقة من طرقنا .

(٢) إنى أستخدم اصطلاح لا متماثل كمضاد لا كمتناقض لتماثل . فإذا كانت س ق ص وكانت العلاقة متماثلة كان عندنا دائماً ص ق س . وإذا كانت لا تماثلية فلن نحصل أبداً على ص ق س . وبعض العلاقات — كاللزوم المنطقى مثلا — ليست متماثلة ولا لا متماثلة . وبدلا من افتراض ق لا متماثلة فقد يمكن أن نضع افتراضاً مكافئاً وهو الذى يسميه الأستاذ بيرس « علاقة غريبة » ، أى علاقة ليس لأى حد علاقة معها (وهذا الافتراض ليس مكافئاً للامتماثل على العموم بل فقط حين يرتبط بالتعدى) .

(٣) يمكن أن نقرأ ق التى تسبق ، وقَ التى تتبع ، بشرط عدم السماح بأى أفكار زمانية أو مكانية بالتدخل .

للفصل Π س‍ ، كانت Π ص‍ داخلة فى Π س‍ . وإذا كانت ط تابعة للفصل $\breve{\Pi}$ س‍ ، كانت $\breve{\Pi}$ ط داخلة فى $\breve{\Pi}$ س‍ . وإذا أخذنا حدين س‍ ، ص‍ يحققان العلاقة س‍ و‍ ص‍ ، فإن جميع الحدود الأخرى تقع فى ثلاثة فصول (١) تلك التابعة للفصل Π س‍ ، وبالتالى للفصل Π ص‍ (٢) تلك التابعة للفصل $\breve{\Pi}$ ص‍ ، وبالتالى للفصل Π س‍ (٣) تلك التابعة للفصل Π س‍ ، ولكن ليس للفصل $\breve{\Pi}$ ص‍ . فإذا كانت ط من الفصل الأول حصلنا على ط و‍ س‍ ، ط و‍ ص‍ . وإذا كانت ف من الفصل الثانى حصلنا على س‍ و‍ ف ، ص‍ و‍ ف وإذا كانت و من الفصل الثالث حصلنا على س‍ و‍ و ، و و‍ ص‍ . وقد استبعدنا حالة ص‍ و‍ ى ، ى و‍ س‍ ، لأن س‍ و‍ ص‍ ، ص‍ و‍ ى تستلزم س‍ و‍ ى ، وهو ما لا يتفق مع ى و‍ س‍ . وهكذا نحصل فى الحالات الثلاث على (١) س‍ بين ط ، ص‍ ؛ (٢) ص‍ بين س‍ ، ف ؛ (٣) و بين س‍ ، ص‍ . ويترتب على ذلك أن أى ثلاثة حدود فى المجموعة فهى بحيث يكون واحد منها بين الآخرين وتؤلف المجموعة كلها متسلسلة واحدة . فإذا لم يكن للفصل (٣) حدود قيل إن س‍ ، ص‍ متعاقبان . ولكن هناك علاقات كثيرة و‍ يمكن وضعها ولها دائماً حدود فى الفصل (٣) . فإذا فرضنا مثلاً أن و‍ هى علاقة « قبل » ، وكانت مجموعتنا هى مجموعة اللحظات فى فترة معينة من الزمن أو فى سائر الزمان ، فهناك لحظة بين أى لحظتين فى المجموعة . وكذلك الحال فى المقادير التى سميناها فى الباب الأخير من الجزء الثالث متصلة ، وليس فى الطريقة الراهنة كما كان الحال فى الطريقة السابقة ما يوجب أن تكون هناك حدود متعاقبة ، ما لم يكن العدد الكلى للحدود فى المجموعة متناهيا . ومن جهة أخرى لا تسمح هذه الطريقة بالمتسلسلات المقفلة ، إذْ أنه نظراً إلى تعدى العلاقة و‍ ، فإنْ كانت المتسلسلة مقفلة ، وكان س‍ أى حد من حدودها ، لحصلنا على س‍ و‍ س‍ ، وهذا محال لأن و‍ لا متماثلة . وبذلك لا يمكن أن تكون العلاقة المولدة فى المتسلسلة المقفلة متعدية[1] . وكما كان الحال فى الطريقة السابقة ، ربما كان للمتسلسلة طرفان ، وربما كان لها طرف واحد ، وربما لم يكن لها أى طرف . وفى الحالة الأولى وحدها قد تكون متناهية ، ولكن حتى فى هذه الحالة قد تكون لا متناهية ،

---

(١) انظر شرحاً أكثر دقة فى الباب الثامن والعشرين .

أما فى الحالتين الأخريين فيجب أن تكون كذلك .

١٩١ – (٣) وقد تتكون المتسلسلة بواسطة المسافات ، كما بينا ذلك جزئيًّا فى الجزء الثالث ، وسنوفى شرح ذلك فيما يلى . وفى هذه الحالة إذا بدأنا من حد معين س فسنحصل على علاقات هى مقادير بين س وبين عدد من الحدود الأخرى ص ، ط . . . إلخ . وبحسب هذه العلاقات من حيث إنها أكبر أو أصغر يمكننا ترتيب الحدود المناظرة . فإذا لم تكن هناك علاقات شبيهة بذلك بين الحدود الباقية ص ، ط . . . فلن نحتاج إلى شىء آخر . ولكن إذا كان لها علاقات هى مقادير من نفس النوع ، احتجنا إلى بعض البديهيات حتى نضمن أن الترتيب قد يكون مستقلاً عن الحد الخاص الذى نبدأ منه . فإذا وضعنا س ط رمزا للمسافة بين س ، ط فإذا كان س ط أصغر من س و ، فلا بد أن تكون ص ط أصغر من ص و . وينتج عن ذلك – وهى نتيجة لم يكن لها محل عندما كانت س هى الحد الوحيد الذى له مسافة – أن المسافات لا بد أن تكون علاقات لا متماثلة ، وما كان من المسافات له جهة واحدة فلا بد أن تعتبر أصغر من صفر . لأن قولنا « س ط أصغر من و س » يتضمن أن « و ط أصغر من وو » أى و ط أصغر من صفر . وبهذه الطريقة ترتد الحالة الراهنة عمليًّا إلى الثانية . لأن كل زوج من حدود س ، ص سيكون بحيث أن س ص أصغر من صفر ، أو س ص أكبر من صفر . ويمكن أن نقول فى الحالة الأولى ص ق س ، وفى الثانية س ق ص . ولكننا نحتاج إلى بديهية أخرى لكى يمكن إجراء الترتيب دون إبهام . فإذا كان س ط = ص وَ وكان ط وَ = س ص ، فلا بد أن يكون و ، وَ نفس النقطة . وبهذه البديهية الإضافية يكون إرجاع هذه الحالة إلى الحالة (٢) كاملا .

١٩٢ – (٤) وحالات العلاقات المثلثة triangular relations لها القوة على إنشاء الترتيب . ولنفرض العلاقة ع تقوم بين ص ، (س ، ط) وبين ط ، (ص ، ى) وبين ى ، (ط ، و) وهكذا . أما « بين » فهى نفسها هذه العلاقة ، وحينئذ ربما كانت هذه هى الطريقة الأعظم مباشرة وطبعا لتكوين الترتيب . فنقول فى هذه الحالة إن ص بين س ، ط عندما تقوم العلاقة ع بين ص والزوج س ، ط . ولا بد لنا من فروض بالنسبة للعلاقة ع تثبت أنه إذا كانت ص بين س ،

ط ، وكانت ط بين ص ، و ، عندئذ ص ، ط يقوم كل منهما بين ط ، و ، أى أنه إذا كانت ص ع (س ، ط)، ط ع (ص ، و)، فلا بد أن تكون ص ع (ص ، و) ، ط ع (س ، و) . وهذا نوع من التعدى الثلاثى الحدود . كذلك إذا كانت ص بين س ، و وكانت ط بين ص ، و ، إذن ط لا بد أن تكون بين س ، و ، وأن تكون ص بين س ، ط أى أنه إذا كانت ص ع (س ، و) وكانت ط ع (ص ، و) إذن ط ع (س ، و) ، ص ع (س ، ط) . كذلك يجب أن تكون ص ع (س ، ط) مكافئة لـ ص ع (ط ، س)[1] . وبهذه الفروض يتكون ترتيب لا إبهام فيه بين أى عدد من الحدود بحيث تقوم لأى ثلاثة منها العلاقة ع . أما أن هذه المسائل تقبل أو لا تقبل مزيدا من التحليل فأمر أرجئ بحثه للباب التالى .

١٩٣ — (٥) لم نجد حتى الآن طريقةً لتكوين المتسلسلات المتصلة المقفلة ، ومع ذلك فهناك أمثلة لهذه المتسلسلات كالزوايا ، والخط المستقيم الناقصى ، والأعداد المركبة التى لها مقياس معلوم . ولذلك لزم أن توضع نظرية تسمح بإمكان وجود هذه المتسلسلات ، وفى الحالات التى تكون الحدود فيها علاقات لا متماثلة كالمستقيمات ، أو عندما تكون هذه الحدودمرتبطة ارتباطاً وحيدا وعكسيًّا بمثل هذه العلاقات ، فالنظرية الآتية تفى بالغرض المطلوب . أما فى الحالات الأخرى فيمكن استخدام الطريقة السادسة التى سيأتى ذكرها بعد .

ليكن س ، ص ، ط ... مجموعة من العلاقات اللامتماثلة ، ولتكن ع علاقة لا متماثلة تقوم بين كل اثنين س ، ص ، أو ص ، ط ؛ إلا فى الحالة التى تكون فيها ص هى العلاقة العكسية لـ س . ولنفرض كذلك أن العلاقة ع هى بحيث إذا قامت بين س ، ص فإنها تقوم بين ص وعكس س . وإذا كانت س أى حد من حدود المجموعة ، فلنفترض أن جميع الحدود التى لها مع س العلاقة ع أو عَ هى حدود المجموعة . وجميع هذه الشروط متحققة فى الزوايا ، وحيثما تتحقق كانت المتسلسلة الناجمة عن ذلك مقفلة . لأن س ع ص تستلزم ص ع سَ ، ومن ثمَّ سَ ع صَ ، وإذن صَ ع س . أى أنه بواسطة العلاقة ع يمكن أن نسير من س ونعود

---

(١) انظر peano, I Principii di Geometria, Turin, 1889, Axioms VIII, IX, X, XI.

إلى س مرة أخرى . وأيضا ليس فى التعريف ما يمنع من أن تكون المتسلسلة متصلة ـ ولكن لما كانت المتسلسلة مقفلة ، فلا يمكن تطبيق فكرة « بين » تطبيقا كليًّا ، ولكن فكرة الانفصال يمكن تطبيقها دائما . والسبب فى وجوب افتراض أن الحدود إما أنها علاقات لا متماثلة أومترابطةمع مثل هذه العلاقات ، أن هذه المتسلسلات لها عادة أقطاب مقابلة antipodes ، أو « مقابلات» كما قد تسمى فى بعض الأحيان، وأن فكرة « المقابل » opposite يظهر أنها مرتبطة جوهريًّا بعكس العلاقة اللامتماثلة .

١٩٤ – (٦) وبنفس الطريقة التى شرحناها فى (٤) لتكوين متسلسلة من علاقات « بين » ، نستطيع أن نكوّن المتسلسلات مباشرة من علاقات الانفصال الرباعية الحدود . وفى هذه الحالة أيضا تلزمنا بعض البديهيات . وقد بين ڤايلاتى[1] Vailati أن البديهيات الخمس الآتية كافية ، كما بين بادوا Padoa أن لها استقلالا ترتيبيًّا ، أى لا يمكن استنتاج أى واحدة منها من سابقاتها[2] . ولنرمز لقولنا « ا ، ب يفصلان حـ عن ء » بالرمز ا ب ‖ حـ ء ، فنحصل على :

(١) ا ب ‖ حـ ء تكافئ حـ ء ‖ ا ب

(٢) ا ب ‖ حـ ء تكافئ ا ب ‖ ء حـ

(٣) ا ب ‖ حـ ء تستبعد ا حـ ‖ ب ء

(٤) لأى أربعة حدود من مجموعتنا يجب أن يكون ا ب ‖ حـ ء أو ا حـ ‖ ب ء أو ا ء ‖ ب حـ .

(٥) إذا كانت ا ب ‖ حـ ء ، ا حـ ‖ ب هـ إذن ا حـ ‖ ء هـ .

وبواسطة هذه الفروض الخمسة تكتسب الحدود ا ، ب ، حـ ، ء ، هـ . . . ترتيباً لا إبهام فيه نبدأ فيه من علاقة بين زوجين من الحدود، وهو ترتيب غير معين إلا بالقدر الذى تعينه الفروض المذكورة . وسأرجئ إلى مرحلة متأخرة المزيد من بحث هذه الحالة عندما نبحث فى علاقة الانفصال .

الطرق الست المذكورة لتكوين المتسلسلات هى الطرق الرئيسية التى أعرفها ، وجميع الطرق الأخرى يمكن ردها فيما أعلم إلى هذه الطرق الست. والطريقة الأخيرة

---

(١) Rivista di Matematica, V, pp. 76, 183.

(٢) المرجع السابق ص ١٨٥ .

وحدها هي التي تؤدى إلى تكوين متسلسلة متصلة مقفلة ليست حدودها علاقات لا متماثلة ولا مرتبطة بمثل هذه العلاقات[١] . لهذا يجب أن تطبق هذه الطريقة الأخيرة على الهندسة الإسقاطية والهندسة الناقصية ، حيث يظهر أن ترابط النقط على مستقيم مع المستقيمات الخارجة من نقطة ، تابع منطقياً لترتيب النقط على المستقيم . ولكن قبل أن نقرر إذا كانت هذه الطرق الست (وخاصة الرابعة والسادسة) مستقلة ولا يمكن ردّها ، فلا بد أن نبحث فى معنى الترتيب (وهو ما لم نقم به حتى الآن) ، كما يجب أن نبحث فى المكونات المنطقية (إنْ وجدت) ، التى يتركب منها هذا المعنى . وهذا ما سنفعله فى الباب القادم .

---

(١) انظر الباب الثامن والعشرين .

الباب الخامس والعشرون

معنى الترتيب

١٩٥ – تبينت لنا الآن الظروف التى يوجد فيها ترتيب بين مجموعة من الحدود ، فحصلنا بهذه الطريقة على معرفة استقرائية معينة عن طبيعة الترتيب . ولكنا لم نواجه حتى الآن هذا السؤال وهو : ما الترتيب ؟ وهو سؤال صعب لم يُكتب فيه شىء على الإطلاق فيما أعلم . وجميع المؤلفين الذين اطلعت على كتبهم يكتفون بعرض الكيفية التى يتكون بها الترتيب ، ولما كان معظمهم إنما يعرض فقط طريقة واحدة من الطرق الست التى بيناها فى الباب الرابع والعشرين ، فمن اليسير عليهم الخلط بين تكوين الترتيب وطبيعته . وقد تبين لنا هذا الخلط من تعدد الطرق السابقة ، إذ من الواضح أننا نعنى بالترتيب شيئاً معينا تماماً ، ويجب أن يكون من حيث إنه يتكون على حد سواء فى جميع الطرق الست متميزاً عن كل طريقة من الطرق التى بها يتكون ومتميزا عنها كلها ، اللهم إلا إذا كانت إحدى هذه الطرق هى الرئيسية وأن الأخرى تُرد إليها . والهدف من هذا الباب توضيح هذا العنصر المشترك فى جميع المتسلسلات مع عرض الحجج المنطقية المتصلة به . وهذه المناقشة ذات أهمية فلسفية خالصة ، ويمكن إغفالها تماماً عند بحث الموضوع بحثا رياضياً .

ولكى نتدرج فى الخوض فى هذا الموضوع ، فلنفرز مناقشة فكرة « بين » عن فكرة الفصل بين الأزواج ، حتى إذا اتفقنا على طبيعة كل فكرة منهما على انفراد شرعنا بعد ذلك فى الجمع بينهما ، والنظر فى ذلك الأمر المشترك بينهما . وسأبدأ الحديث عن « بين » لأنها أسهل الفكرتين .

١٩٦ – « بين » تتميز (كما رأينا فى الباب الرابع والعشرين) بأنها علاقة حد واحد ص مع حدين آخرين س ، ط تقوم كلما كان للحد س مع ص ، والحد ص مع ط ، علاقة ما ليست للحد ص مع س ، ولا للحد ط مع ص ، ولا للحد ط مع س[1] .

---

(١) الشرط القائل بأن ط ليس له مع س العلاقة المذكورة شرط غير جوهرى نسبياً ، من جهة أننا

وهذه الشروط لا شك أنها « كافية » للبينية ، أما أنها « ضرورية » فموضع نظر . ولا بد لنا من التمييز بين عدة آراء محتملة فى هذا الصدد . (١) فقد نذهب إلى أن الشروط المذكورة تعطى معنى « بين » بالذات ، وأنها تكوِّن التحليل الفعلى له لا أنها مجرد مجموعة شروط تحقق وجوده . (٢) وقد نذهب إلى أن « بين » ليست علاقة الحدود س ، ص ، ط أصلا . بل هى علاقة العلاقة من ص إلى س ، ومن ص إلى ط ، أى علاقة اختلاف الجهة . (٣) وقد نذهب إلى أن « بين » فكرة لا يمكن تعريفها مثل « أكبر » و « أصغر » . وأن الشروط السابقة تبيح لنا استنتاج أن ص بين س ، ط ، ولكن يمكن أن تكون هناك ظروف أخرى تحصل فيها البينية ، بل قد تحصل دون أن تتطلب وجود أى علاقة سوى التعدد بين الأزواج (س ، ص) ، (ص ، ط) ، (س ، ط) . ولكى نفصل فى أمر هذه النظريات يحسن بنا أن نبحث كلاً منها على حدة .

١٩٧ — (١) فى هذه النظرية نعرف قولنا « ص بين س ، ط » بأنه يعنى : « هناك علاقة ع بحيث تكون س ع ص ، ص ع ط ولكن ليس ص ع س ، ط ع ص » . أما هل نضيف إلى ذلك « ليس ط ع س » فموضع نظر. وسنفترض بادئ الأمر أن هذه الإضافة لم تحدث . وينشأ عن ذلك أن القضايا الآتية نسلم عموماً بأنها واضحة بذاتها :

(ا) إذا كان ص بين س ، ط ، وكان ط بين ص ، و ، إذن ص بين س ، و .

(ب) إذا كان ص بين س ، ط ، وكان و بين س ، ص ، إذن ص بين و ، ط . ومن باب الاختصار دعنا نتفق على أن نرمز للعبارة « ص بين س ، ط » بالرمز س ص ط ، وبذلك يمكن كتابة القضيتين السابقتين هكذا :

(ا) س ص ط ، ص ط و تستلزمان س ص و ، (ب) س ص ط ، س و ص تستلزمان و ص ط .

إنما نحتاج إليه فى حالة ما إذا كان ص بين س ، ط فربما لم يكن ط بين ص ، س ، أو ط بين س ، ص ، فإذا شئنا أن نسمح بأن يكون كل حد منها بين الحدين الآخرين كالحال مثلا فى زوايا المثلث ، فيمكن حذف الشرط المذكور بتاتاً . أما الشروط الأربعة الأخرى فيظهر على العكس أنها أكثر جوهرية .

ويجب أن نضيف أن العلاقة « بين » متماثلة فيما يختص بالطرفين ، أى أن س ص ط تستلزم ط ص س . وهذا الشرط ينتج مباشرة من تعريفنا . ومما تجدر ملاحظته بالنسبة للبديهتين (ا) ، (ب) أن « بين » من الوجهة الراهنة للنظر تكون دائما مضافة لعلاقة ما ع ، وأننا إنما نفترض صحة البديهتين عندما تكون العلاقة بعينها هى القائمة فى كلا المقدمتين . ولننظر الآن فى هاتين البديهيتين أهما نتيجتان لتعريفنا أو لا . وسنصطلح على كتابة ع بدلاً من لا – ع .

س ص ط تعنى س ع ص ، ص ع ط ، ص ع س ، ط ع ص
ص ط و تعنى ص ع ط ، ط ع و ، ط ع ص ، و ع ط .

وهكذا نجد أن ص ط و إنما تضيف إلى س ص ط الشرطين وهما ط ع و ، و ع ط . فإذا كانت ع متعدية حقق الشرطان س ص و ، وإذا لم تكن ع كذلك فلا . وقد رأينا كيف يمكن أن تتولد بعضُ المتسلسلات من علاقات واحد بواحد ع ليست متعدية ، ومع ذلك ففى مثل هذه الحالات إذا رمزنا بالرمز ع[٢] للعلاقة بين س ، ط التى تلزم عن س ع ص ، ص ع ط ، وهكذا للقوى الأعلى ، أمكننا أن نستبدل بالعلاقة ع علاقة متعدية عَ ، حيث تدل « عَ على قوة ما موجبة للعلاقة ع » . وبهذه الطريقة إذا صحت س ص ط على علاقة هى قوة ما معينة للعلاقة ع ، إذن س ص ط تصح للعلاقة عَ بشرط ألا تكون أى قوة موجبة للعلاقة ع مكافئة للعلاقة عَ ، إذْ فى هذه الحالة الأخيرة لا بد أن نحصل على ص ع ص كلما كان عندنا س ع ص ، ولا يمكن وضع عَ بدلا من ع فى تفسير س ص ط . ولكن هذا الشرط وهو أن عكس ع لا يجب أن يكون قوة موجبة ا ع ، يكافئ الشرط القائل بأن متسلسلتنا لا يجب أن تكون مقفلة . لأنه إذا كانت عَ = عن ، إذن عَ = عن+١ . ولكن ما دامت ع علاقة واحد بواحد ، فإن ع عَ يستلزم علاقة التطابق . وبذلك فإن ن + ١ من الخطوات تعود بنا من س إلى س مرة ثانية ، وتكون متسلسلتنا مقفلة ، وعدد حدودها هو ن + ١ . ولقد سبق أن اتفقنا على أن « بين » لا تنطبق تماماً على المتسلسلات المقفلة ، ومن هنا كان هذا الشرط ، وهو ألا تكون عَ قوة للعلاقة ع ، لا يفرض على البديهية (ا) من القيود سوى ما نتوقع أن تكون خاضعة لها .

أما بالنسبة للبديهية (ب) فيحصل عندنا :

س ص ط = س ع ص . ص ع ط . ص ع س . ط ع ص

س و ص = س ع و . و ع ص . و ع س . ص ع و .

والحالة التى تشير إليها هذه البديهية إنما تكون ممكنة إذا لم تكن ع علاقة واحد بواحد ، ما دمنا نحصل على س ع ص ، س ع و . واستنتاج و ص ط هو ههنا نتيجة مباشرة للتعريف دون الحاجة إلى أى شروط إضافية .

بقى أن نبحث هل يمكن الاستغناء عن شرط ط ع س فى تعريف « بين » . فإذا فرضنا أن ع علاقة واحد بواحد ، وأن ط ع س متحققة ، حصلنا على س ص ط = س ع ص . ص ع ط . ط عَ ص . ص عَ س وعندنا كذلك و ع س فرضا ، فما دامت ع علاقة واحد بواحد ، وما دامت س ع ص ، فإن س ع ط . ومن ههنا نحصل بمقتضى التعريف على ص ط س ، وبالمثل نحصل على ط س ص . فإذا تمسكنا بالبديهية (ا) حصلنا على س ط س ، وهو محال . إذ لا شك أن جزءاً من معنى « بين » هو أن الحدود الثلاثة فى العلاقة لا بد أن تكون مختلفة ، ومن المحال وجود حد بين س ، س . وبذلك إما أن ندخل الشرط وهو ط ع س ، وإما أن نضع الشرط الجديد فى التعريف وهو أن س ، ط ، لا بد أن يكونا مختلفين . (وينبغى ملاحظة أن تعريفنا يستلزم أن س مختلف عن ص ، وأن ص مختلف عن ط . وإذا لم يكن الأمر كذلك لكانت س ع ص تستدعى ص ع س . وكذلك ص ع ط تستدعى ط ع ص) . وقد يبدو من الأفضل إدخال الشرط القائل بأن س ، ط مختلفان . لأن هذا على أى حال ضرورى ، وليس لازماً عن ط عَ س . يجب إذن إضافة هذا الشرط إلى البديهية (ا) ، وهو أن س ص ط . ص ط و تستلزمان س ص و إلا إذا كان س ، و متطابقين . وليست هذه الإضافة ضرورية فى البديهية (ب) . ما دامت متضمنة فى المقدمات. وإذن ليس شرط ط عَ س ضرورياً إذا شئنا أن نسلم بأن س ص ط تتفق مع ص ط و — ومثال زوايا المثلث تجعل هذا التسليم ممكناً . وقد نضع بدلا من ط ع س الشرط الذى سبق أن وجدنا أنه لازم للصحة العامة البديهية (ا) وهو ألا تكون أى قوة للعلاقة ع مكافئة لعكس ع . لأنه لو صحت س ص ط ،

ص ط س معاً فستحصل (على الأقل بالنسبة إلى س، ص ، ط) على ع^٢ = عَ ؛ أى إذا كانت س ع ص ، صع ط إذن ط ع س . ويبدو أن هذا السبيل الأخير هو الأفضل . وإذن فى جميع الحالات التى أول ما تعرف فيها « بين » بعلاقة واحد بواحد ع، نستبدل بها علاقة عَ التى تدل على « قوة موجبة ما لعلاقة ع » . عندئذ تكون علاقة عَ متعدية . ويكون الشرط القائل بأنه لا قوة موجبة لعلاقة ع مكافئة لعكسها أى عَ . مكافئاً للشرط بأن عَ لا متماثلة . وأخيراً يمكن تبسيط الموضوع كله فيما يلى :

القول بأن ص بين س . ط يكافئ القول بوجود علاقة ما متعدية لا متماثلة تعلق كلا من س ، ص وتعلق ص، ط .

وهذه العبارة البسيطة الموجزة كما يتبين من المناقشة الطويلة السابقة ليست أكثر ولا أقل من تعريفنا الأصلى . مع التعديلات التى وجدنا تدريجيًّا أنها لازمة . ومع ذلك يبقى هذا السؤال : هل هذا هو معنى « بين » ؟ .

١٩٨ ــ لو أجزنا هذه العبارة « ع علاقة " بين " س . ص » لترتب عليها فوراً حالة نفى . فالعبارة كما يلاحظ القارىء قد استبعدت بصعوبة من تعريفات « بين » ، لأن إدخالها فى التعريف يجعله على الأقل لفظيا يدور فى حلقة مفرغة . وربما لا يكون لهذه العبارة سوى أهمية لغوية أو عسى أنها تشير إلى نقص حقيقى فى التعريف المذكور . ولنشرع فى فحص علاقة العلاقة ع مع حديها س، ص . أول كل شىء لا نزاع فى وجود مثل هذه العلاقة . فأنْ يكون هناك حد له العلاقة ع مع حد آخر ما . فلا شك أن له علاقة مع ع . وهى علاقة يمكن التعبير عنها بأنها « تنتمى لميدان ع » . فإذا قلنا س ع ص ، كانت س منتمية لميدان ع ، ص لميدان عَ . فإذا رمزنا لهذه العلاقة بين س ، ع ، أو بين ص، ع بالرمز E ، حصلنا على س E ع . ص E عَ . وإذا رمزنا بعد ذلك لعلاقة ع بالعلاقة عَ بالرمز I ، حصلنا على عَ I ع و ع I عَ . وإذن نحصل على س E ع ، ص IE ع. ولكن لما كانت EI ليست بأى حال عكس E ، فلا ينطبق تعريف « بين » المذكور ، إذا عوّلنا على هذا السبب فقط . ولا كذلك E أو E I متعدية . وإذن فتعريفنا لعلاقة « بين » لا ينطبق بالمرة فى مثل هذه الحالة . وربما يساورنا

الشك فى أمر « بين » ألها فى هذه الحالة أصلا نفس المعنى الذى لها فى الأحوال الأخرى . ولا ريب أننا لا نحصل بهذه الطريقة على متسلسلات : لأن س ، ص لا يقعان فى نفس الجهة مثل ع بين ع والحدود الأخرى . وعلاوة على ذلك لو سلمنا بعلاقات حد مع نفسه ، لسلمنا بأن مثل هذه العلاقات هى « بين » حد ونفسه ، وهو ما اتفقنا على استحالته . ومن ثَمّ قد نميل إلى اعتبار استخدام « بين » فى هذه الحالة عرضاً لغويًّا يرجع إلى أن العلاقة تذكر عادة بين الموضوع والمحمول ، كما نقول « ا هو والد ب » . ومن جهة أخرى قد يقال إن العلاقة لها بالفعل علاقة خاصة مع الحدين اللذين تقوم بينهما ، وأن « بين » لا بد أن تدل على علاقة حد واحد مع حدين آخرين . ونقول فى الرد على الاعتراض بأن علاقات حد مع نفسه أن مثل هذه العلاقات تكوّن فى أى نظام صعوبة منطقية خطيرة ، وأنه يحسن إن أمكن إنكارُ صحتها الفلسفية ، وأنه حتى حيث تكون العلاقة القائمة هى التطابق ، فلا بد من وجود حدين متطابقين ، فهما إذن غير متطابقين تماماً . ولما كانت هذه المسألة تثير صعوبةً جوهرية لا نستطيع مناقشتها ههنا ، فقد يحسن أن نمر بالجواب مر الكرام[1] . وربما يقال بعد ذلك إن استخدام نفس اللفظ فى مقامين مختلفين يدل دائما على وجه ما من الشبه يجب أن يحدد مداه كل من ينكر أن المعنى فى الحالين واحد ، وأن وجه الشبه ههنا لا ريب أنه أعمق من مجرد ترتيب ألفاظ فى جملة ، وهو على كل حال شبه أكثر تغيراً فى هذا الصدد من العبارة القائلة بأن العلاقة هى بين حديها . وردنا على هذه الملاحظات أن المعترض نفسه قد بين وجه الشبه تماماً من أن علاقة العلاقة بحديها هى علاقة حد واحد بحدين آخرين ، كالحال فى علاقة « بين » ، وهذا هو الذى يجعل الحالتين متشابهتين . وهذا الرد الأخير صحيح فى نظرى ، ويمكن أن نسمح بأن علاقة العلاقة بحديها مع أنها تنطوى على مشكلة منطقية هامة ، إلا أنها ليست نفس علاقة « بين » التى عليها يقوم الترتيب .

ومع ذلك فتعريف « بين » المذكور على الرغم من أننا سنضطر فى آخر الأمر إلى قبوله ، يكاد يبدو لاول وهلة ناقصًا من وجهة نظر فلسفية ، لأن الإشارة إلى علاقة لا متماثلة « مّا » إشارة مبهمة ، يظهر أنها تحتاج إلى استبدالها بعبارة أخرى

---

(١) انظر الفقرة ٩٥ .

لا تظهر فيها هذه العلاقة غير المعينة ، وإنما تظهر فيها الحدود والبينية فقط . وهذا يفضى بنا إلى البحث فى الرأى الثانى عن « بين » .

١٩٩ — (٢) قد يقال إنّ « بين » ليست علاقة ثلاثة حدود بالمرة بل علاقة حدين هما اختلاف الجهة . فإذا اصطنعنا هذه الوجهة من النظر ، فأول ما يجب ملاحظته ، أننا نفتقر إلى العلاقتين المتقابلتين ، لا بصفة عامة فقط ، بل بالتخصيص من حيث انتماؤهما إلى حد واحد بالذات . وهذا التمييز مألوف لدينا من قبل عندما بحثنا حالة المقادير والكميات . ثم إن « قبل » و « بعد » مأخوذين مجردين لا يكوّنان « بين » ، وإنما ينشأ « بين » حين يكون حد واحد بعينه هو قبل وبعد فى آن واحد ، وعندئذ يكون هذا الحد بين ما هو قبله وما هو بعده . ومن ثم كانت هناك صعوبة فى رد « بين » إلى اختلاف الجهة . والعلاقة المتخصصة شيء محير منطقيا ، وقد رأينا فى الجزء الأول (بند ٥٥) أنه من الضرورى إنكارها ، وليس من السهل تماماً التمييز بين علاقة ذات صلة بعلاقتين ومتخصصة بانتمائها لنفس الحد ، وبين علاقة الحد المذكور مع حدين آخرين . وفى الوقت نفسه هناك مزايا عظيمة يحققها رد « بين » إلى اختلاف الجهة ، إذْ نتخلص من ضرورة الالتجاء إلى علاقة مثلثة ربما يعترض عليها كثير من الفلاسفة ، ونعين عنصراً مشتركا فى جميع الحالات التى تقوم فيها « بين » ، وهى اختلاف الجهة ، أى الاختلاف بين علاقة لا متماثلة وعكسها .

٢٠٠ — والسؤال عن العلاقة المثلثة أيمكن أن توجد على الإطلاق ، سؤال حله بالفعل صعب وغير مهم فى آن واحد ، ولكن صياغته بدقة فى غاية الأهمية . ويلوح أن الفلاسفة يذهبون عادةً — ولو أن ذلك ليس بصراحة فيما أعلم — إلى أن العلاقات ليس لها أبداً أكثر من حدين ، بل إن مثل هذه العلاقات يردونها بالقوة أو بالحيلة إلى المحمولات . أما الرياضيون فيكادون يجمعون على الكلام عن علاقات متعددة الحدود . ومع ذلك فلا يمكن أن نحل المسألة بمجرد الرجوع لأمثلة رياضية ، لأننا نرجع بالسؤال على هذه الأمثلة أتقبل التحليل أو لا تقبله . ولنفرض مثلا أننا عرفنا مستوى الإسقاط بأنه علاقة بين ثلاث نقط ، فأكبر الظن أن الفيلسوف سيقول دائما كان ينبغى تعريف هذا المستوى كعلاقة بين نقطة وخط ، أو كعلاقة

بين خطين متقاطعين — وهو تغيير لا يحدث إلا فرقاً قليلا من الناحية الرياضية أو لا يحدث فرقا بالمرة . ولننظر الآن فى معنى السؤال بالضبط ، فنقول : من بين الحدود يوجد نوعان يختلفان اختلافا جوهريًّا ، وعلى أساس هذا الاختلاف تقوم حقيقة مذهب الذات والصفات . فهناك حدود لا يمكن أن تقع إلا حدوداً ، مثل : النقط ، اللحظات ، الألوان ، الأصوات ، أجزاء المادة ، وبوجه عام الحدود من النوع الذى تتكون منه الموجودات . ومن ناحية أخرى هناك حدود يمكن أن تقع على نحو آخر غير الحدود ، مثل : الوجود ، الصفات عموماً ، والعلاقات . وقد اتفقنا على تسمية هذه الحدود تصورات Concepts [1] . وورود التصورات لا على أنها حدود هو ما يميز القضايا عن مجرد التصورات ؛ وفى كل قضية يوجد على الأقل تصور واحد أكثر مما فيها من حدود . أما النظرية التقليدية — التى يمكن تسميتها نظرية الموضوع والمحمول — فإنها تذهب إلى أن كل قضية فيها حد واحد هو الموضوع ، وتصور واحد ليس حدًّا هو المحمول . ويجب اطراح هذه الوجهة من النظر لأسباب كثيرة[2] .

وأيسر اختلاف عن الرأى التقليدى يقع فى تسليمنا بأنه حيث لا تقبل القضايا أن ترد إلى صورة الموضوع والمحمول فهناك دائما حدان فقط ، وتصور واحد ليس حدًّا . (قد يكون الحدان بالطبع مركبين ، وقد يشتمل كل منهما على تصورات ليست حدوداً) . ومن هنا تنشأ الفكرة القائلة بأن العلاقات تقوم دائماً بين حدين فقط ، إذ يمكن تعريف العلاقة بأنها تصور يقع فى قضية تشتمل على أكثر من حد واحد . ولكننا لا نجد سببا « أوليًّا » لقصر العلاقات على حدين ، وهناك حالات تؤدى إلى ما يخالف ذلك . فأولا حين نحكم بتصور عدد على مجموعة ، وكانت المجموعة مركبة من ن من الحدود ، فهناك ن من الحدود ، وتصور واحد فقط (وهو ن) ليس حدا . وثانيا أن العلاقات التى هى من قبيل الموجود الذى يبعد عن زمان ومكان وجوده إنما يمكن أن ترد بطريقة مشوشة إلى علاقات مع حدين[3] . فإذا ذهبنا إلى أن هذا الرد أساسى ، فيبدو أنه دائما ممكن صوريًّا

(١) انظر الجزء الأول الباب الرابع .

(٢) انظر للمؤلف . The Philosophy of Leibniz, Cambridge, 1900, Chap. II, § 10

(٣) انظر الجزء السابع الباب الرابع والخمسين .

بتأليف جزء من القضية فى حد واحد مركب ، ثم تقرير علاقة بين هذا الجزء وبين باقى القضية الذى يمكن كذلك أن يرد إلى حد واحد . وقد تكون هناك حالات لا يمكن فيها إجراء ذلك ، ولكنى لم أصادف مثل هذه الحالات . أما أن مثل هذا الرد الصورى مما يجب إجراؤه دائما ، فمسألة فيما أعلم ليست بذات أهمية عملية أو نظرية كبيرة .

٢٠١ — من كل ذلك نرى أنه ليس ثمة سبب « أولى » صحيح يرجح تحليل « بين » إلى علاقة تربط بين علاقتين ، إلا إذا رأينا أن العلاقة المثلثة أفضل . وهذا السبب الآخر فى ترجيح كفة تحليل « بين » هو الأهم . إذ ما دامت « بين » علاقة مثلثة بين الحدود ، فلا بد أن تؤخذ إما على أنها لا تُعَرَّف ، وإما على أنها ذات صلة بعلاقة ما متعدية لا متماثلة . غير أننا إذا جعلنا « بين » تقوم أساساً على تقابل علاقتين ينتميان لحد واحد ، فعسى أن يزول أى أثر للإبهام . قد يقال فى الاعتراض على هذه الوجهة من النظر إنه لا سبب يظهر الآن لِمَ وجب أن تكون العلاقات المذكورة متعدية ، وأن نفس معنى « بين » — وهذا هو الأهم — يتضمن الحدود ، لأن الترتيب حاصل لها هى لا لعلاقاتها . ولو أن العلاقات كانت هى وحدها التى لها مدخل فى الأمر ، فلم يكن من الضرورى كما هو الواقع أن نخصها بذكر الحدود التى تقوم بينها . جملة القول ينبغى أن نتخلى عن الرأى القائل بأن « بين » ليست علاقة مثلثة .

٢٠٢ — (٣) . ونتناول الآن بالبحث النظرية القائلة بأن « بين » علاقة أولية لا تقبل التعريف . ومما يعزز هذه الوجهة من النظر أننا فى جميع طرقنا لتوليد المتسلسلات المفتوحة نستطيع أن نتبين نشوء حالات من البينية ، ونستطيع اختبار التعاريف المقترحة . وربما ظهر من هذا أن التعاريف المقترحة كانت مجرد شروط تتضمن علاقات « بين » ولم تكن تعاريف صحيحة لهذه العلاقة . وسؤالنا : هل مثل هذه الشروط أو تلك تضمن لنا وقوع صه بين سه ، ط ؟ سؤال نستطيع دائما الإجابة عنه بغير رجوع (على الأقل عن شعور) إلى أى تعريف سابق . ومما يؤيد أن طبيعة « بين » لا تقبل التحليل هو أن العلاقة متماثلة بالنسبة للطرفين ، ولم تكن

الحال كذلك بالنسبة لعلاقات الأزواج التى استنتجنا منها « بين » . بيد أن هناك عقبة كأداء فى سبيل هذه الوجهة من النظر ، ذلك أن لمجموعات الحدود تراتيب كثيرة مختلفة قد نجد فى ترتيب منها أن ص بين س ، ط ، وفى ترتيب آخر س بين ص ، ط [1] وهذا يبين فيما يظهر أن « بين » أساساً تتطلب صلة بالعلاقات التى استنتجت منها ، وإلا فعلينا على الأقل أن نسلم بأن هذه العلاقات داخلة فى تكوين المتسلسلات لأن المتسلسلات تتطلب حتماً أن تكون هناك على الأكثر علاقة واحدة للبينية بين ثلاثة حدود . ومن أجل ذلك لا بد لنا فى الظاهر أن نقبل أن « بين » ليست المصدر الوحيد للمتسلسلات ، بل يجب أن نلحقها بذكر علاقة ما متعدية لا متماثلة عنها تنشأ البينية . وكل ما يمكن قوله هو أن هذه العلاقة المتعدية اللامتماثلة بين حدين ربما تكون نفسها تابعة منطقياً لعلاقة ما ثلاثية الحدود ومشتقة منها ، كتلك التى بحثناها فى الباب الرابع والعشرين عند ذكر الطريقة الرابعة فى تكوين المتسلسلات . فعندما تحقق مثل هذه العلاقات البديهيات المذكورة سابقا ، فإنها تؤدى بذاتها إلى علاقات تقوم بين أزواج الحدود . لأننا قد نقول إن ب تسبق ح حين تستلزم ا ح ء ب ح ء ، وأن ب تتبع ح حين تستلزم ا ب ء ح ب ء ، حيث ا ، ء حدان ثابتان . ومع أن مثل هذه العلاقات إنما هى مشتقة فقط ، إلا أنه بفضلها تقع « بين » فى مثل هذه الأحوال . ويبدو أننا مضطرون آخر الأمر لإغفال الإشارة إلى العلاقة اللامتماثلة فى تعريفنا ، فنقول :

يقع الحد ص بين الحدين س ، ط بالنسبة إلى علاقة متعدية لا متماثلة ع حين تكون س ع ص ، ص ع ط . ولا يمكن القول إن ص تقع حقاً فى أى حالة أخرى بين س ، ط . وهذا التعريف لا يعطينا مجرد معيار بل يعطينا معنى البينية ذاتها .

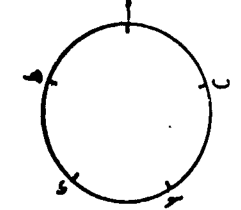
٢٠٣ — وعلينا أن ننظر بعد ذلك فى معنى انفصال الأزواج separation of couples. وهى علاقة أكثر تعقيداً من علاقة « بين » ، ولم يُلتفت إليها قليلا حتى أبرزت

---

(١) هذه الحالة توضحها الأعداد المنطقة التى يمكن أن تؤخذ بترتيب المقدار أو فى ترتيب من التراتيب (مثل الترتيب المنطق) التى تكون فيها غير معدودة . والترتيب المنطق هو الترتيب الذى يجرى على هذا النحو : ١ ، ٢ ، $\frac{١}{٢}$ ، ٣ ، $\frac{١}{٣}$ ، $\frac{٢}{٣}$ ، ٤ ، . . . .

الهندسةُ الناقصية أهميتها. فقد بين ڤايلاتى[1] أن هذه العلاقة تتطلب دائماً، مثل علاقة « بين »، علاقة متعدية لا متماثلة بين حدين . غير أن هذه العلاقة الخاصة بزوج من الحدود لها ذاتها صلة بثلاثة حدود ثابتة أخرى من المجموعة ، كالحال فى « بين » حين رأينا أنها متصلة بحدين ثابتين . كذلك من الواضح أنه حيثما وجدت علاقة متعدية لا متماثلة تعلق كل زوج من الحدود فى مجموعة لا تقل عن أربعة حدود ، وجدت عندئذ أزواج من الأزواج لها علاقة الانفصال separation . وبذلك يكون فى استطاعتنا التعبير عن الانفصال كما فعلنا فى « بين » بواسطة علاقات متعدية لا متماثلة مع حدودها . ولنشرع الآن أولا فى بحث معنى الانفصال .

يمكن أن ندل على أن ا ، حـ منفصلتان بواسطة ب ، ء بالرمز ا ب حـ ء . فإذا كانت ا ، ب ، حـ ، ء، هـ أى خمسة حدود فى المجموعة احتجنا إلى أن تكون الخواص الآتية قائمة بالنسبة لعلاقة الانفصال (ويلاحظ أن الأخيرة منها فقط هى التى تحتوى على خمسة حدود) .



(١) ا ب حـ ء = ب ا ء حـ

(٢) ا ب حـ ء = ا ء حـ ب

(٣) ا ب حـ ء تستبعد ا حـ ب ء

(٤) يجب أن نحصل على ا ب حـ ء أو ا حـ ء ب أو ا ء حـ ب

(٥) ا ب حـ ء ، ا حـ ء هـ معاً يستلزمان ا ب ء هـ[2] .

ويمكن توضيح هذه الخواص بوضع خمس نقط على محيط دائرة ، كما هو موضح بالشكل . وأى علاقة بين زوجين من الحدود لها هذه الخواص سنسميها علاقة الانفصال بين الزوجين . وسيتبين أن هذه العلاقة متماثلة ولكنها ليست على العموم متعدية .

٢٠٤ ــ حيثما وجدت علاقة متعدية لا متماثلة ع بين أى حدين فى مجموعة لا تقل عن أربعة حدود ، نشأت بالضرورة علاقة الانفصال . ففى أى متسلسلة إذا كان لأربعة حدود هذا الترتيب وهو ا ب حـ ء ، كانت ا ، حـ منفصلتين بواسطة ب ، ء . وقد رأينا أن كل علاقة متعدية لا متماثلة تولد متسلسلةً بشرط

---

(١) Rivista di Matematica. V, pp. 75 - 78 — See also Pieri, I Principii della Geometria di posizione, Turin, 1898. § 7.

(٢) هذه الخواص الخمس مأخوذة عن ڤايلاتى ، انظر المرجع السابق ص ١٨٣ .

وجود حالتين متعاقبتين على الأقل من العلاقة المذكورة . وفى هذه الحالة يكون الانفصال مجرد امتداد لعلاقة « بين » . فإذا كانت ع علاقة متعدية لا متماثلة ، وكان ا ع ب ، ب ع حـ ، حـ ع ء ، إذن ا ، حـ منفصلان بواسطة ب ، ء . فوجود مثل هذه العلاقة شرط كاف للانفصال .

وهى أيضا شرط ضرورى . ولنفرض أن هناك علاقة انفصال ، ولنفرض ا ، ب ، حـ ، ء ، هـ خمسة حدود من المجموعة التى تنطبق العلاقة عليها . فإذا اعتبرنا ا ، ب ، حـ ثوابت ، واعتبرنا ء ، هـ متغيرين ، أمكن أن تتولد اثنتا عشرة حالة . وبفضل الخواص الأساسية الخمسة المذكورة سابقا يمكننا إدخال الرمز ا ب حـ ء هـ ليدل على أنه إذا حذفنا حرفاً من هذه الخمسة كان للأربعة الباقية علاقة الانفصال المبينة بالرمز الناتج . وهكذا من الخاصية الخامسة نجد أن ا ب حـ ء ، ا حـ ء هـ تستلزمان ا ب حـ ء هـ [١] . وهكذا تنشأ الحالات الاثنتا عشرة من تبديل ء ، هـ مع إبقاء ا ، ب ، حـ ثوابت . (من الملاحظ أن ظهور حرف فى النهاية أو البداية لا يحدث أى فرق ، مثال ذلك أن ا ب حـ ء هـ هى عين الحالة التى تكون فيها هـ ا ب حـ ء . وبذلك يمكننا أن نقرر عدم وضع ء أو هـ قبل ا). من هذه الحالات الاثنتى عشرة نجد أن ستا فيها ء قبل هـ ، وستا فيها هـ قبل ء . وفى الحالات الست الأولى نقول إن ء تسبق هـ بالنسبة لجهة ا ب حـ . وفى الحالات الأخرى نقول إن هـ تسبق ء . ولكى نبحث فى حالات محدودة سنقول إن ا تسبق كل حد آخر ، وأن ب تسبق حـ[٢] . سنجد إذن أن علاقة السبق لا متماثلة متعدية ، وأن كل زوج من الحدود فى مجموعتنا فهو بحيث يسبق أحدها ويتبعه الآخر . وبهذه الطريقة تختزل علاقة الانفصال من الناحية الصورية على الأقل إلى ما اجتمع من (ا يسبق ب » « ب يسبق حـ » ، « حـ يسبق ء » .

هذا الاختزال reduction المذكور عظيم الأهمية لأسباب كثيرة . فهو أولا يبين أن التمييز بين المتسلسلات المفتوحة والمقفلة سطحى بعض الشىء . لأن

---

(١) البرهان على ذلك ممل بعض الشىء ولذلك سأصرف عنه النظر ، وهو موجود عند ڤايلاتى والمرجع السابق .

(١) انظر المرجع السابق Pieri, p. 32.

المتسلسلة ولو أنها قد تكون فى أول الأمر من النوع المسمى مقفلا ، فإنها تصبح بعد إدخال العلاقة المتعدية المذكورة مفتوحة ، ويكون ا بدايتها ولكن عسى ألا يكون لها حد أخير ولا ترجع من أى جهة إلى ا . وهو ثانيا بالغ الأهمية فى الهندسة ، لأنه يوضح كيف ينشأ الترتيب على الخط المستقيم الناقصى بخواص إسقاطية بحتة وذلك بطريقة أكثر إرضاء من طريقة شتاوت[1] Staudt . وهو أخيراً عظيم الأهمية من جهة أنه يوحد بين مصدرى الترتيب ، وهما « بين » والانفصال ، لأنه يبين أن العلاقات المتعدية اللامتماثلة تكون موجودة دائما حيث تحصل أيهما ، وأن أى واحدة منهما تستلزم الأخرى . ذلك أنه بواسطة علاقة السبق يمكن لنا أن نقول إن حداً واحداً بين حدين آخرين ، مع أننا بدأنا فقط من انفصال الأزواج .

٢٠٥ — وفى الوقت نفسه لا يمكن أن نعتبر هذا الاختزال أكثر من إجراء صورى (ويبدو كذلك أن هذه الحال بالنسبة للاختزال المناظر له فى حالة « بين ») . أى أن الحدود الثلاثة ا ، ب ، حـ جوهرية للتعريف ولا يمكن حذفها ، لأنها هى التى بالعلاقة معها أمكن تعريف علاقتنا المتعدية اللامتماثلة . وليس فى هذا الاختزال من سبب لافتراض وجود أى علاقة متعدية لا متماثلة مستقلة عن « جميع » الحدود الأخرى غير تلك المتعلقة بها على الرغم من أن اختيار هذه الحدود الأخرى هو اختيار تحكمى . ومما يوضح هذه الحقيقة أن الحد ا الذى لا يمتاز بخاصية جوهرية يظهر كأول المتسلسلة . وحيثما توجد علاقات متعدية لا متماثلة مستقلة عن كل صلة خارجية ، فلا يمكن أن يكون للمتسلسلة طرف أول تحكمى ، علما بأنها ربما لا يكون لها طرف أول بتاتا . وبذلك تبقى العلاقة الرباعية الحدودللانفصال سابقة منطقياً على العلاقة الثنائية الحدين الناتجة ، ولا يمكن تحليل الأولى إلى الأخيرة .

٢٠٦ — ولكن ليس قولنا إن الاختزال صورى أنه لا مدخل له فى توليد الترتيب ، على العكس إمكان هذا الاختزال كان سببا فى جعل العلاقة الرباعية الحدود تؤدى إلى الترتيب . والعلاقة المتعدية اللامتماثلة الناجمة هى فى الواقع علاقة بين

---

(١) تتضح مزايا هذه الطريقة فى كتاب بيرى المذكور سابقاً ، حيث أمكن بالدقة استنتاج كثير من الأشياء التى كان يظهر أنها لا تخضع للبرهان الإسقاطى من مقدمات إسقاطية . انظر الجزء السادس الباب الخامس والأربعين .

خمسة حدود ، ولكن حين يحتفظ بثلاثة منها ثابتة ، فإنها تصبح بالنسبة للحدين الآخرين علاقة لامتماثلة ومتعدية . وهكذا مع أن « بين » تنطبق على مثل هذه المتسلسلات ، ومع أن جوهر الترتيب يقوم هنا وفى أى مكان آخر على أن حداً واحداً له مع حدين آخرين علاقات عكسية لامتماثلة ومتعدية ، إلا أن مثل هذا الترتيب إنما يمكن أن ينشأ فى مجموعة تشتمل على الأقل على خمسة حدود ، لأن هذه العلاقة الخاصة تحتاج إلى خمسة حدود . وينبغى أن نلاحظ أن « جميع » المتسلسلات حين نفسرها على هذا النحو فهى متسلسلات مفتوحة بمعنى وجود علاقة مّا بين أزواج الحدود . وليست أى قوة من قوى هذه العلاقة مساوية لعكسها أو لعلاقة التطابق .

٢٠٧ – ولنلخص الآن هذه المناقشة الطويلة المعقدة ، فنقول : الطرق الست التى سردناها فى الباب الرابع والعشرين لتوليد المتسلسلات هى جميعا طرق متميزة تميزا أصلياً، ولكن الثانية منها هى وحدها فقط الأساسية ، وأما الخمسة الباقية فتتفق فى أنها يمكن ردها إلى الثانية . فضلا عن أن إمكان ردها إلى الثانية هو وحده الذى يجعلها تؤدى إلى نشأة الترتيب . وأقل قضية ترتيبية يمكن وضعها كلما كان هناك ترتيب أصلا ، فهو من هذه الصورة : « ص بين س ، ط » . وهذه القضية تعنى أن « هناك علاقة متعدية لامتماثلة تقوم بين س ، ص وبين ص ، ط » . وكان فى الإمكان تخمين هذه النتيجة البسيطة جداً من أول الأمر ، ولكن كان علينا أن نبحث فى جميع الحالات التى يظهر أنها استثنائية قبل أن نرسى النتيجة على قواعد سليمة .

العلاقات اللاتماثلية

٢٠٨ – لقد رأينا أن الترتيب كله يتوقف على العلاقات المتعدية اللاتماثلية . ولما كان مثل هذه العلاقات مما لم يقبل المنطق التقليدى التسليم به ، وكان عدم التسليم بها أحد المصادر الرئيسية للتناقض الذى وجدته الفلسفة النقدية فى الرياضة ، كان من المستحسن قبل أن نمضى فيما نحن بصدده أن نرتاد روضة المنطق البحث ، ونرسى الأساس الذى يجعل التسليم بهذه العلاقات لازما . وبعد ذلك ، أى فى الباب الحادى والخمسين من الجزء السادس سأحاول الرد على الاعتراضات العامة للفلاسفة على العلاقات . وكل ما يعنينى فى الوقت الحاضر هو العلاقات اللاتماثلية .

ويمكن تقسيم العلاقات إلى أربعة فصول من حيث أن لها إحدى خاصتين ، التعدى[1] والتماثل ، والعلاقات من مثل س ع ص تستلزم دائماً ص ع س تسمى "متماثلة" ، والعلاقات التى هى بحيث س ع ص ، ص ع ط تستلزم دائماً س ع ط تسمى "متعدية" . والعلاقات التى ليست لها الخاصية الأولى، سأسميها غير متماثلة ، والعلاقات التى لها العلاقة المقابلة ، أى التى فيها س ع ص تستبعد دائماً ص ع س سأسميها لاتماثلية . والعلاقات التى ليست لها الخاصية الثانية فسأسميها غير متعدية . أما تلك التى لها الخاصية أن س ع ص ، ص ع ط يستبعدان دائماً س ع ط فسأسميها لا متعدية ، وجميع هذه الحالات يمكن توضيحها من العلاقات الإنسانية . فالعلاقة أخ أو أخت . متماثلة ومتعدية إذا سلمنا بأن الرجل يمكن أن يكون أخ نفسه ، وأن المرأة يمكن أن تكون أختاً لنفسها . فالعلاقة « أخ » غير متماثلة ولكنها متعدية « والأخ غير الشقيق » أو « الأخت غير الشقيقة » علاقة متماثلة ولكنها غير متعدية ، « والزوج » Epouse علاقة متماثلة ولكنها لا متعدية ، والحفيد لاتماثلية ولكنها متعدية ، والأخ غير الشقيق للأب (أو للأم) غير متماثلة وغير متعدية ، وإذا حرم زواج

---

(١) يبدو أن ديمورجان كان أول من استخدم هذا الاصطلاح بهذا المعنى . انظر Camb. Phil. Trans. IX, p. 104. X, p. 346. والاصطلاح فى الوقت الحاضر شائع فى الاستعمال .

الطبقة الثالثة third marriages فإنها تكون لامتعدية. وابن الزوج (أو ابن الزوجة) لاتماثلية وغير متعدية ، وإذا حرم زواج الطبقة الثانية second marriages فإنها تكون لا متعدية ، وأخ الزوج (أو الزوجة) غير متماثلة وغير متعدية . وأخيراً فالأب لاتماثلية لامتعدية . ومن العلاقات غير المتعدية وغير اللامتعدية توجد إلى حد علمنا حالة هامة واحدة وهى حالة التعدد diversity ، ومن العلاقات غير التماثلية، ولكنها غير لاتماثلية، توجد أيضاً على ما يبدو حالة هامة واحدة وهى حالة اللزوم ، وفى الحالات الأخرى التى نصادفها عادةً تكون العلاقات إما متعدية أو لامتعدية ، وتكون متماثلة أو لاتماثلية .

٢٠٩ – والعلاقات التى هى متعدية وتماثلية معاً ، تكون صورتها من طبيعة التساوى. وأى حد من مجال هذه العلاقة تكون له العلاقة المذكورة مع نفسه ، ولو أنه قد لا تكون له مثل هذه العلاقة مع أى حد آخر . ذلك أننا إذا رمزنا للعلاقة بعلامة التساوى ، وكانت ا أى حد من مجال العلاقة ، فإنه لا يوجد حد آخر ب بحيث يكون ا = ب . فإذا كان ا ، ب متطابقين فإن ا = ا . وإذا لم يكونا متطابقين فما دامت العلاقة تماثلية فإن ب = ا ، ولما كانت العلاقة متعدية ، وكان ا = ب فإن ب = ا ، وينتج من هذا أنّ ا = ا ، وقد سمى بيانو خاصة العلاقة التى تضمن أنها تقوم بين الحد ونفسه الانعكاس Reflexiveness ، وأثبت – على خلاف ما كان عليه الاعتقاد قبله – أنه لا يمكن استنتاج هذه الخاصة من التماثل والتعدى . ذلك أنه لا واحدة من هاتين الخاصيتين تقرر أنه توجد ب بحيث أن ا = ب ولكنها تقرر فقط ما يتبع فى حالة وجود مثل هذه الباء ، وإذا لم توجد هذه الباء ، فإن إثبات أن ا = ا ينهار[1] . ومع ذلك فخاصة الانعكاس هذه تؤدى إلى صعوبات ، ولا توجد غير علاقة واحدة تصح فيها هذه الخاصة دون قيد وهى علاقة التطابق . وفى جميع الحالات الأخرى تقوم هذه الخاصة فقط بين حدود فصل معين . فالتساوى الكمى مثلاً يكون انعكاسيا فقط من حيث كونه ينطبق على الكميات ، أما بالنسبة للحدود الأخرى فمن لغط القول أن نقرر أن لها تساوياً كمياً مع نفسها . والتساوى المنطقى ، كذلك ، يكون انعكاسيا فقط فى حالة الفصول

(١) انظر مثلا Revue de Mathématique, T VII, p. 22; Notations de Logique Mathématique Turin, 1894, p. 45, F. 1901, p. 193.

أو القضايا أو العلاقات . والآنية إنما تكون انعكاسية بالنسبة للأحداث فقط ، وعلى ذلك فإننا إذا أعطينا علاقة تماثلية متعدية ، غير علاقة التطابق ، فلا يمكننا تقرير الانعكاس إلا بالنسبة لحدود فصل معين . وعن هذا الفصل ، فيما عدا مبدأ التجريد (الذى ورد ذكره فى الجزء الثالث ، الباب الرابع عشر ، والذى سيأتى الكلام عنه بالتفصيل عما قليل) فلا حاجة بنا إلى تعريف ما فيما خلا امتداد العلاقة التماثلية المتعدية موضوع الكلام . وعندما يكون الفصل معرّفا على هذا النحو ، فالانعكاس داخل هذا الفصل ينتج كما رأينا عن التعدى والتماثل .

٢١٠ — وباستخدام ما أسميته مبدأ التجريد[١] يمكن توضيح فكرة الانعكاس توضيحاً أفضل إلى حد ما . ولقد عرّف[٢] بيانو عملية أسماها التعريف بالتجريد ، وأوضح أنها شائعة الاستخدام فى الرياضيات . وبيان هذه العملية كما يأتى : عندما تكون لدينا علاقة متعدية وتماثلية وانعكاسية (داخل مجالها) فإذا قامت هذه العلاقة بين و ، ف فإننا نعرف شيئاً جديداً ϕ (و) بحيث تكون مطابقة إلى ϕ (ف) وبذلك نكون قد حللنا العلاقة إلى عينية العلاقة بالنسبة للحد الجديد ϕ (و) أو ϕ (ف) ، ولكى تكون هذه العملية مشروعة كما وضعها بيانو يلزمها بديهية . وهى البديهية التى تقول إنه إذا وجدت حالة للعلاقة التى نتكلم عنها ، وجدت ϕ (و) أو ϕ (ف) ، وهذه البديهية هى المبدأ الذى أسميه مبدأ التجريد ، وهو الذى تجرى صياغته على وجه الدقة كما يأتى : « كل علاقة متعدية متماثلة يوجد منها على الأقل حالة واحدة ، يمكن تحليلها إلى علاقة جديدة لحد جديد ، والعلاقة الجديدة هى بحيث لا يمكن أن توجد هذه العلاقة بين أى حد وبين أكثر من حد واحد ولكن عكسها ليست له هذه الخاصة » ، وهذا المبدأ بالكلام الدارج يُقرر أن العلاقات المتماثلة المتعدية تنشأ عن خاصة مشتركة ، مع إضافة أن هذه الخاصة تقوم بالنسبة للحدود التى تتصف بها ، فى علاقة لا يمكن لأى شىء آخر أن يقوم بها بالنسبة لهذه الحدود . وهى بذلك تعطى النص الدقيق للمبدأ الذى كثيراً ما يطبقه الفلاسفة ،

---

(١) البديهية المفروض أنها متطابقة مع هذا المبدأ ولكنها ليست مصاغة بالدقة الضرورية وغير مبرهنة ، وموجودة عند. De Morgan, Camb. Phil. Trans. Vol. X, p. 345

(٢) Notations de Logique Mathématique, p. 45.

وهو أن العلاقات المتماثلة المتعدية تنشأ من تطابق المضمون . ومع ذلك فتطابق المضمون عبارة غاية فى الغموض ، تعطيها القضية السالفة الذكر ، فى الحالة الراهنة ، معنى دقيقاً ولكنه معنى لا يحقق بأى حال الغرض من تلك العبارة ، وهو على ما يبدو رد العلاقات إلى صفات للحدود المتعلقة .

ونستطيع الآن أن نأتى على بيان أوضح لخاصة الانعكاس . ولتكن ع هى علاقتنا المتماثلة . ولتكن ح هى العلاقة اللامتماثلة التى يجب أن تقوم بين حدين من الحدود ذات العلاقة ع وبين حد ثالث ما . فتكون القضية س ع ص مكافئة إلى « يوجد حد ما ا بحيث أن س ح ا ، ص ح ا » وينتج عن هذا أنه إذا كان س تابعة لما أسميناه ميدان ح أى أنه إذا كان هناك أى حد بحيث أن س ح ا ، فإن س ع س ، ذلك أن س ع س ما هى إلا س ح ا ، س ح ا . ولا ينتج عن هذا بطبيعة الحال أنه يوجد حد آخر ص بحيث يكون س ع ص ، وبذلك تكون اعتراضات بيانو على البرهان التقليدى للانعكاس صحيحة . ولكنا بتحليل العلاقات المتماثلة المتعدية قد حصلنا على برهان لخاصة الانعكاس مع بيان القيود الدقيقة التى تخضع لها .

٢١١ ــ نستطيع الآن أن نرى الأسباب التى من أجلها استبعدنا طريقة سابعة من طرق توليد المتسلسلات . وهى طريقة قد يكون بعض القراء توقعوا وجودها ، وهذه هى الطريقة التى يكون فيها الوضع مجرد وضع نسبى ؛ ولم نقبل هذه الطريقة بالنسبة للكميات كما سبق فى البند ١٥٤ من الباب التاسع عشر . ولما كانت فلسفة المكان والزمان كلها مرتبطة بموضوع مشروعية هذه الطريقة ، التى هى فى الواقع موضوع الوضع المطلق أو النسبى ، يجدر بنا أن نبحثها هنا ، ونبين كيف أن مبدأ التجريد يؤدى إلى النظرية المطلقة للوضع .

فإذا نظرنا فى متسلسلة مثل متسلسلة الأحداث ، وإذا رفضنا التسليم بالزمان المطلق ، كان علينا أن نسلم بثلاث علاقات أساسية بين الأحداث وهى : الآنية والقبلية والبعدية . ويمكن تقرير مثل هذه النظرية صوريا كما يأتى : ليكن معلوماً فصلاً من الحدود هو بحيث أن أى حدين س ، ص لهما إما علاقة لامتماثلة متعدية ق أو العلاقة العكسية قَ أو علاقة متماثلة متعدية ع ، ولنفترض أيضا أن

س ع ص ، ص ع ط تستلزمان س ع ط ، وأن س ع ص ، ص ع ط تستلزمان س ع ط عندئذ يمكن ترتيب جميع الحدود فى متسلسلة مع احتمال أن يكون كثير من الحدود لها نفس الموضع فى المتسلسلة . وعلى حسب النظرية العلاقية للوضع ، ليس هذا الموضع إلا العلاقة المتعدية المتماثلة ع لعدد من الحدود الأخرى ، ولكن طبقا لمبدأ التجريد ينتج أنه توجد علاقة مّا ح بحيث إذا كان س ع ص فإنه يوجد حد واحد مّا ر يحقق س ح ر ، ص ح ر ، وسنرى عندئذ أن جميع هذه الحدود ر التى تقابل مجموعات مختلفة من الحدود الأصلية ، تؤلف هى أيضا متسلسلة ولكنها بحيث يكون فيها كل حدين مختلفين لهما علاقة لا متماثلة (صوريا حاصل الضرب حˇ ع ح ، وهذه الحدود ر هى إذن الأوضاع المطلقة للسينات والصادات ، ونكون قد رددنا طريقتنا السابقة لتوليد المتسلسلات إلى الطريقة الأساسية الثانية ، وبذلك لا تكون هناك متسلسلات ذات أوضاع نسبية فقط ، وإنما هى الأوضاع ذاتها التى تكوّن المتسلسلات فى جميع الأحوال[١] .

٢١٢ — ويمكننا الآن أن نواجه بُغْض الفلسفة للعلاقات . وجميع ما ذكرنا عن الترتيب ، والكلام الحالى عن التجريد ، سيكون بطبيعة الحال موضع اعتراضات شديدة من أولئك الفلاسفة —وأخشى أن يكونوا الغالبية— الذين يقولون بأنه ليس هناك علاقات ذات صحة مطلقة وميتافيزيقية . ولست أرمى هنا إلى الخوض فى الموضوع العام ولكنى سأكتفى باستعراض الاعتراضات على أى تحليل للعلاقات اللاتماثلية .

والرأى السائد — عادة بصفة لا شعورية ويستخدم فى المحاجة حتى عند من لا ينادون به صراحة — أن جميع القضايا تتكون فى النهاية من موضوع ومحمول ، وعندما يصادف هذا الرأى قضية علاقية فهناك طريقتان لمعالجتها ، ويمكن تسمية إحداها بالطريقة المونادية monadistic والأخرى بالطريقة الواحدية monistic فإذا أعطينا القضية ا ع ب حيث ع علاقة مّا ، فإن وجهة النظر المونادية تحللها إلى قضيتين ، يمكن أن نسميهما ا $ر_١$ ، ب $ر_٢$ ، وهاتان القضيتان تعطيان ا ، ب على التوالى صفتين مفروض أنهما معاً تكافئتان ع . أما وجهة النظر الواحدية فهى

---

(١) تجد بحثاً صورياً عن الوضع النسبى فيما كتبه شرودر — انظر Sur une extension de l'idée d'ordre, Congrès, Vol. III, p. 235

على عكس ذلك تعتبر العلاقة خاصية للكل المكوَّن من ا ، ب وبهذه الكيفية تكون مكافئة لقضية يمكن أن نرمز إليها بالرمز (ا ب) ر، ويمثل ليبنتز (وبوجه عام) لوتز وجهة النظر الأولى ، ويمثل الثانية سبينوزا ومستر برادلى . ولنفحص هاتين الوجهتين من النظر على التعاقب عند تطبيقهما على العلاقات اللاتماثلية ، وعلى وجه التحديد فلننظر فى علاقتى الأكبر والأصغر .

٢١٣ — وقد عبّر ليبنتز فى وضوح بديع عن وجهة النظر المونادية فى العبارة التالية . « النسبة أو التناسب بين خطين ل ، م يمكن النظر إليها من عدة طرق ، كالنسبة بين الأكبر ل إلى الأصغر م ، أو كالنسبة بين الأصغر م إلى الأكبر ل وإمَّا أخيراً كشىء مَّا مستخرج منهما معاً على أنه النسبة بين ل ، م ، دون اعتبار إلى أيهما المقدم وأيهما التالى ، أو أيهما الموضوع ، وأيهما المحمول . . . وفى الطريقة الأولى نجد أن ل الأكبر ، وفى الثانية م الأصغر هى موضوع ذلك العرض الذى يسميه الفلاسفة علاقة . ولكن أيهما سيكون الموضوع فى الطريقة الثالثة ؟ ولا يمكن القول إن كلا من ل ، م معاً هما موضوع مثل هذا العرض ، إذ لو كان الأمر كذلك لحصلنا على عـَرَضٍ accident فى موضوعين إحدى قدميها فى الواحد وقدمها الأخرى فى الآخر ، وهذا يخالف فكرة الأعراض . وعلى ذلك فيجب أن نقول إن العلاقة فى الطريقة الثالثة هى فى واقع الأمر خارج العـَرَضَيْن ، ولكنها لما كانت لا بالمادة ولا بالعرض فيجب أن تكون مجرد شىء مثالى ، والنظر فيه مع ذلك لا يخلو من فائدة » .

٢١٤ — والطريقة الثالثة للنظر إلى علاقة الأكبر والأصغر هى على وجه التقريب ما يقول به الواحديون ، وفى رأيهم أنّ الكل المركب من ل ، م هو الموضوع وعلى ذلك فنظرتهم إلى النسبة لا ترغمنا ، كما افترض ليبنتز ، على وضعها بين ذوات القدمين . وسنقصر اهتمامنا فى الوقت الحاضر على الطريقتين الأولتين ، فى الطريقة الأولى للنظر إلى الأمر أى « ل (أكبر من م) » نجد أن الكلمات الموضوعة بين قوسين تعتبر صفة تصف ل . ولكننا عندما نفحص هذه الصفة نجدها مركبة ، فهى تتركب على الأقل من الجزأين أكبر ، م ، وكلٌ من هذين الجزأين أساسى . فقولنا إنّ "ل أكبر" لايدل أبداً على ما نقصد من معنى ؛ ومن المحتمل جداً أن "م أكبر"

أيضا . فالصفة التى نفرض أنها تصف ل تتضمن إشارةً إلى م ، ولكن النظرية المذكورة لا توضح معنى هذه الإشارة . والصفة التى تتضمن إشارة إلى م من الواضح أنها صفةٌ بالنسبة إلى م . وما هذه إلا طريقة ملتوية لوصف العلاقة . بعبارة أخرى ، إذا كانت ل ذات صفة تناظر حقيقة كونها أكبر من م ، فهذه الصفة من الوجهة المنطقية تابعة للعلاقة المباشرة بين ل . م وليست سوى مجرد اشتقاق من هذه العلاقة . وإذا استبعدنا م ، فلا شيء يبدو فى تحليل ل يميز بينها وبين م . ومع ذلك فى نظرية العلاقات التى نتكلم عنها ، ل يجب أن تختلف اختلافاً ذاتيا عن م ، ولذلك فسنجد أنفسنا مرغمين ، فى جميع حالات العلاقات اللاتماثلية ، على التسليم باختلافٍ نوعى بين الحدين المتعلقيْن . ولو أن تحليل أى منهما لا يكشف عن وجود أية خاصية متصلة بالموضوع يملكها الواحد ولا نجدها فى الآخر . ويعد هذا بالنسبة للنظرية المونادية تناقضا ، وهو تناقض يهدم النظرية ذاتها التى ينبع منها[1] .

ولنمض فى تطبيق النظرية المونادية على العلاقات الكمية . فالقضية « ا أكبر من ب » يمكن تحليلها إلى قضيتين ، إحداهما تعطى ا صفة ، والأخرى تعطى ب صفة أخرى . وأكبر الظن أن القائل بالرأى الذى نحن بصدده سيذهب إلى أن ا ، ب كميتان لا مقداران وأن الصفتين المطلوبتين هما مقدارا ا . ب ولكن عليه فى هذه الحالة أن يسلم بعلاقة بين المقدارين من النوع اللاتماثل . والتى كان على المقدارين تفسيرها وحينئذ يحتاج المقداران إلى صفتين جديدتين وهكذا إلى ما لا نهاية له ، والعملية اللانهائية يجب أن تتم قبل أن نجد معنى للقضية الأصلية . وهذا النوع من العمليات اللانهائية موضع اعتراض لأن الغرض الوحيد منه هو تفسير معنى قضية معينة ، ومع ذلك فلا تقربنا أى خطوة من خطواته إلى هذا المعنى[2] ، فلا يمكننا لهذا

---

(١) انظر البحث المنشور فى مجلة Mind. N S No. 23. بعنوان « العلاقة بين العدد والكمية » . وقد كتب هذا البحث حين كنت لا أزال متمسكاً بالنظرية المونادية عن العلاقات ، ومن أجل ذلك كان التناقض المذكور أمراً لا يمكن تجنبه . والفقرة التالية التى ننقلها عن كانط تثير نفس المسألة .

(٢) حيث نحتاج إلى عملية لا نهائية من النوع المذكور فنحن بالضرورة بصدد قضية هى الوحدة اللانهائية بالمعنى المبين فى الجزء الثانى الباب السابع عشر .

السبب أن نأخذ مقادير ا ، ب أنهما الصفتان المطلوبتان . ولنمض فى البحث فنقول : ولكننا إذا أخذنا أى صفات كانت ما عدا تلك التى لها بالحد الآخر صلة ، فلن نتمكن حتى من الناحية الصورية أن نقرر شيئا عن العلاقة دون افتراض مثل تلك العلاقة بين الصفتين . لأن مجرد اختلاف الصفتين لن يترتب عليه سوى علاقة تماثلية . مثال ذلك لو كان الحدان المذكوران لونين مختلفين لوجدنا أن ما بين ا ، ب هى علاقة الاختلاف فى اللون وهى علاقة لن تجعلها عناية بحثنا لها لاتماثلية . وإذا رجعنا إلى المقادير فلا يمكن أن نقول سوى أن ا يختلف عن ب فى المقدار مما لا يعطينا أى إشارة إلى أيهما الأكبر . وهكذا يجب أن تكون صفتا ا ، ب بحيث يتعلق كل منهما بالحد الآخر ، كما جاء فى تحليل ليبنتز . فصفة ا يجب أن تكون « أكبر من ب » . وصفة ب يجب أن تكون « أصغر من ا » . وبذلك يختلف ا عن ب ، ما دام لهما صفتان مختلفتان — لأن ب ليس أكبر من ب ، و ا ليس أصغر من ا — ولكن الصفتين خارجتان بمعنى أن صفة ا لها صلة مع ب ، وصفة ب لها صلة مع ا . ولهذا السبب تفشل محاولة تحليل العلاقة ، فنضطر إلى التسليم بما قصدت النظريةُ إلى تجنبه وهو العلاقة التى تسمى « خارجة » أى تلك العلاقة التى لا تستلزم أى تعقيد فى أى حد من الحدين المتعلقين .

ويمكن إثبات نفس النتيجة من العلاقات اللاتماثلية بوجه عام ، ما دامت هذه النتيجة إنما تتوقف على أن كلا من التطابق والتعدد متماثلان . وليكن ا ، ب بينهما علاقة لا تماثلية ع ، بحيث يكون ا ع ب ، ب عَ ا . ولتكن رمز الصفتين المفروضتين (وهما كما رأينا من قبل لا بد أن يكون لكل منهما صلة بالحد الآخر) α ، β على التوالى بحيث يُصبح الحدان على النحو الآتى : ا β ، ب α . وهنا نجد أن α له صلة مع ا ، و β مع ب . ونحن نعلم أن α ، β يختلفان ما داما لا متماثلين . ولكن ا ، ب ليس بينهما اختلاف ذاتى مناظرٌ للعلاقة ع وسابق عليها . وحتى إذا كان بينهما اختلاف ، فإن نقط الاختلاف لا بد أن يكون لها ذاتها علاقة شبيهة بالعلاقة ع . وبذلك لن نظفر بشىء . فإما أن α أو β يعبر عن اختلافٍ بين ا و ب . ولكنه اختلاف بعيد عن أن يكون متقدماً على العلاقة وإنما هو فى الواقع العلاقة ع نفسها ، ما دام α أو β يتطلب صلةً بحدٍ

غير الحد الذى هو صفة له . وما دام α و β كلاهما يفترض العلاقة ع ، فلا يمكن استخدام الاختلاف بين α و β للدلالة على اختلاف ذاتى بين ا و ب . وهكذا نصبح مرة أخرى إزاء اختلاف ليس له نقطة بداية سابقة ، مما يدل على أن بعض العلاقات اللاتماثلية لا بد أن تكون مطلقة ، وأن إحدى هذه العلاقات المطلقة اللاتماثلية على الأقل يجب أن تكون عنصراً مكوناً لأى علاقة تماثلية قد نفرضها .

من السهل انتقاد النظرية المونادية من وجهة نظر عامة باستخراج المتناقضات التى تنشأ من علاقات الحدود بالصفات المتصلة بالعلاقة الأولى التى حللناها . وليست هذه الاعتبارات مرتبطة ارتباطاً خاصاً باللاتماثل ، ولكنها تنتمى للفلسفة العامة ، وقد بسطها أنصار النظرية الواحدية . أما عن النظرية المونادية فإليك ما يقوله عنها برادلى[1] « اختصار القول : نحن مسوقون بمبدأ الانشطار دون أن نصل إلى غاية . فكل صفة لها علاقة ، لها تبعا لذلك ضرب من التعدد داخل طبيعتها ذاتها ، وهذا التعدد لا يمكن أن يكون ثابتا مباشرة للصفة ، ومن ثم يجب أن تتنازل الصفة عن وحدتها لعلاقة داخلية ، فإذا تحررت الصفة على هذا النحو ، فينبغى أن يكون كل مظهر من المظاهر المتعددة، من حيث إنه شىء له علاقة ، شيئاً كذلك وراء العلاقة . وفى هذا التعدد القضـاء المبرم على الوحدة الداخلية لكل مظهر منها بحيث تحتاج إلى علاقة جديدة ، وهكذا إلى غير النهاية » . ويبقى بعد ذلك أن نفحص عن أمر النظرية الواحدية ألا تصبح حين تتجنب هذه الصعوبة خاضعة لصعوبات أخرى لا تقل عنها خطورة .

٢١٥ – تذهب النظرية الواحدية إلى أن كل قضية علاقية ا ع ب تنحل إلى قضية تتصل بالكل الذى يتركب من ا ، ب وهى قضية يمكن أن ندل عليها بقولنا (ا ب) ع . ويمكن أن نفحص هذه الوجهة من النظر كما فحصنا الوجهة الأخرى إما بالإشارة خاصة إلى العلاقات اللاتماثلية ، وإما من جهة الفلسفة العامة . ويقول أصحاب هذا المذهب إن الكل يشتمل بذاته على تعدد، وإنه يتركب الاختلافات، وإنه يحقق أعمالا أخرى شبيهة بذلك . أما أنا فأصرح بعجزى عن نسبة أى معنى

---

(١) Appearance and Reality, 1 st Edition, p. 3.

مضبوط لهذه العبارات ، ومع ذلك فسأبذل قصارى جهدى .

يقولون: إن القضية « ا أكبر من ب ، لاتقرر فى الحقيقة شيئاً عن ا أو عن ب ، بل عنهما معاً . ولما كانت القضية تدل على الكل الذى يتألف من (ا ب) فسنفترض أنّ (ا ب) يشتمل على تعدد فى المقدار » . وإذا نحن أغفلنا جانبا جميع الحجج ذات الصفة العامة فى الوقت الراهن ، نجد اعتراضا خاصاً يوجه للعبارة السالفة فى حالة اللاتماثل . ذلك أن (ا ب) متماثلة بالنسبة لـ ا ، ب ، وتنطبق بذلك خاصية الكل بالضبط فى الحالة التى تكون فيها ا أكبر من ب وكذلك فى حالة ما تكون ب أكبر من ا . وقد أدرك ليبنتز الذى لم يقبل النظرية الواحدية ولم ير ما يدعو لتبريرها هذه الحقيقة بوضوح ، كما يتبين من النص المذكور آنفا . ذلك إنه طبقا لطريقته الثالثة فى النظر إلى النسبة ratio ، لا نعتبر أى الجزأين المقدم وأيهما التالى ، والحق أنه من الواضح بما فيه الكفاية أن الكل (ا ب) من حيث أنه كذلك ليس فيه مقدم ولا تالٍ . ولكى نميز بين كلٍ هو (ا ب) من كلٍ آخر هو (ب ا) إذا وجب أن نغفل ذلك عند تفسير اللاتماثل ، فسنضطر إلى الرجوع عن الكل إلى الأجزاء وما بينها من علاقة . لأن (ا ب) و (ب) يشتملان بالضبط على الأجزاء نفسها . ولا يختلفان فى أى اعتبار كان سوى جهة العلاقة بين ا ، ب . وقولنا « ا أكبر من ب » و « ب أكبر من ا » قضيتان يشتملان بالضبط على نفس المكونات ، وينشأ عنهما تبعا لذلك بالضبط نفس الكل ، ولا يقوم الخلاف بينهما إلا فى أن أكبر فى الحالة الأولى علاقة من ا لـ ب ، وفى الحالة الثانية من ب لـ ا . وبذلك يكون تمييز الجهة ، أى التمييز بين علاقة لا تماثلية وعكسها ، تمييزا تعجز النظرية الواحدية عن العلاقات عن تفسيره بالكلية .

ويمكن أن نبسط من الحجج ذات الصفة العامة ما لا حصر له ، غير أن الحجة التالية يبدو أنها داخلة فى موضوعنا بوجه خاص . فعلاقة الكل بالجزء هى نفسها علاقة لاتماثلية ، والكل — كما يهوى الواحديون بوجه خاص أن يقولوا — متميز عن جميع أجزائه ، تعديداً وجملةً فى آن واحد . ولذلك حين نقول : « ا جزء من ب » فنحن نعنى فى الواقع بفرض صحة النظرية الواحدية أن نقرر شيئا عن الكل المكون من ا و ب والذى لا يجب أن يلتبس مع ب . ولو لم تكن القضية

المتعلقة بهذا الكل الجديد قضية كلٍ وجزء . فلن يكون ثمة أحكام صادقة عن الكل والجزء ، ويكون من الخطأ تبعا لذلك القول بأن العلاقة بين الأجزاء هى حقاً صفةٌ للكل . أما إذا كانت القضية الجديدة قضيةَ كلٍ وجزءٍ ، فستحتاج إلى قضية جديدة لتفسيرها ، وهكذا دواليك . ولو ذهب الواحدىُّ كإجراءٍ يائس إلى القول بأن الكل المركب من ا ، ب ليس متميزا عن ب ، فإنه مضطر إلى التسليم بأن الكل هو (بمعنى المنطق الرمزى) مجموع أجزائه ، وهذا إلى جانب هجرانه موقفه تماماً يجعله لا مناص له من اعتبار الكل متماثلا بالنسبة لأجزائه — وهى وجهة نظر رأينا من قبل أنها محتومة . ومن ثمّ نجد أن الواحديين مسوقون نحو وجهة النظر القائلة بأن الكل الوحيد الحق ، وهو المطلق ، لا أجزاء له أصلا ، وأنه لا قضية خاصة به أو أى شىء آخر صادق — وهى وجهة نظر لا مفر من تناقضها عند مجرد تقريرها .ولا ريب فى أنّ الرأى القائل بأن جميع القضايا ينتهى بها الأمر إلى أن تتناقض مع ذاتها ، لهو رأى مقضىٌ عليه إذا سلمنا به أن يكون أيضا متناقضا مع نفسه .

٢١٦ — رأينا حتى الآن أن العلاقات اللاتماثلية غير معقولة طبقا لكلا النظريتين العاديتين للعلاقات[١] . ولذلك ما دامت مثل هذه العلاقات داخلةً فى العدد ، والكمية ، والترتيب ، والمكان ، والزمان ، والحركة فمن العسير أن نطمع فى فلسفة مُرْضية للرياضيات ، ما دمنا متمسكين بالنظرية القائلة بأنه لا علاقة يمكن أن تكون « خارجية بحتة » . ولكن سرعان ما نصطنع نظرية مختلفة عنها حتى يتضح أن الألغاز المنطقية التى حار فيها الفلاسفة قد أصبحت مصطنعة . ومن بين الحدود التى تعتبر عادةً أنها علاقية وهى المتماثلة والمتعدية — مثل التساوى والآنية — قادرة أن ترد إلى ما سمى فى شىء من الإبهام بتطابق المضمون identity of content ، ولكن هذا بدوره يجب أن يُحَلَّل إلى عينية sameness العلاقة مع حد مَّا آخر . ذلك أن الخواص المزعومة لحد من الحدود ليست فى الواقع سوى حدود أُخرى تقوم بينها علاقة مَّا . والخاصية المشتركة لحدين هى حد ثالث لهما به نفس العلاقة .

---

(١) ستبحث أسس هاتين النظريتين من وجهة نظر أعم فى الجزء السادس الباب الواحد والخمسين .

هذا الاستطراد الطويل الذى خاض بنا فى بحر المنطق أوجبته أهمية الترتيب الجوهرية ، كما أوجبته استحالة تفسير الترتيب دون أن نصرف النظر عن أعز العقائد الفلسفية وأكثرها شيوعا . ذلك أنه فيما يتعلق بالترتيب كل شىء يتوقف على اللاتماثل واختلاف الجهة ، غير أن هذين المفهومين لا يعقلان فى ظل المنطق التقليدى . وسنفحص فى الباب التالى عن علاقة اختلاف الجهة ، بما يظهر فى الرياضيات باسم اختلاف العلامة sign . وسنتناول فى هذا الفحص الموضوعات الرياضية مرة أخرى ، ولو أن الحديث لا يزال فى حاجة إلى بعض المنطق البحت . وهذا ما يشغل جميع الأبواب الباقية من هذا الجزء .

اختلاف الجهة واختلاف العلامة

٢١٧ – رأينا حتى الآن أن الترتيب يتوقف على العلاقات اللاتماثلية ، وأن هذه العلاقات اللاتماثلية لها على الدوام جهتان ، مثل القبل والبعد ، الأكبر والأصغر ، الشرق والغرب ، إلخ . واختلاف الجهة مرتبط ارتباطا وثيقا (ولو أنه ليس متطابقا) مع اختلاف العلامة الرياضى . وهذه فكرة لها أهمية جوهرية فى الرياضيات ، ولا يمكن بمقدار علمى تفسيرها بعبارات من أى أفكار أخرى . ويبدو أن أول فيلسوف تنبه لأهميتها هو كانط . ففى كتابه "محاولة لإدخال فكرة المقادير السالبة فى العالم" .[1]

نجده على بينة من التقابل المنطقى وتقابل السلب والإيجاب . وفى المناقشة التى أوردها فى كتابه " فى السبب الأول للتمييز بين المساحات فى المكان "[2]

نجد إدراكا كاملا لأهمية اللاتماثل فى العلاقات المكانية ، كما نجد دليلا يستند إلى تلك الحقيقة على أن المكان لا يمكن أن يكون علاقيا تماماً[3]. ولكن يبدو من المشكوك فيه أنه أدرك الصلة بين هذا اللاتماثل وبين اختلاف العلامة. ففى عام ١٧٦٣ من الثابت أنه لم يتنبه إلى هذه الصلة ، لأنه اعتبر الألم مقدارا سلبيا من اللذة ، وزعم أنه من الممكن إضافة لذه كبيرة إلى ألم صغير فيحصل عنهما لذة أصغر[4] ، وهى وجهة نظر تبدو فاسدة منطقيا ونفسانيا على حد سواء . وفى كتابه « التمهيد » (١٧٨٣) Prolegomena ، (الفقرة ١٣) جعل – كما هو معروف – العلاقات اللاتماثلية المكانية أساساً لاعتبار المكان مجرد صورة للحدس ، لا كما يظهر من مناقشته عام ١٧٦٨ ، أن المكان لا يمكن أن يقوم – كما ذهب إلى ذلك ليبنتز – على مجرد علاقات بين الأشياء ، ثم عجز ، تبعا لتمسكه بالاعتراض المنطقى على العلاقات

---

(١) Versuch den Begriff der Negativen Gröss in die Weltweishcti einzuführen (1763).

(٢) Von dem ersten Grunde Unterschiedes der Gegenden im Raume 1768

(٣) انظر بوجه خاص نشرة Hart. Vol. II, pp. 386, 391.

(٤) نشرة Hart., Vol. II, 83.

والذى ناقشناه فى الباب السابق ، أن يخلص فكرة المكان المطلق ذى العلاقات اللاتماثلية بين أجزائه من التناقض . ومع أننى لا يمكن أن أعتبر هذه النظرية الكانطية الأخيرة والأكثر تميزا ، تقدماً عما رآه سنة ١٧٦٨ ، إلا أن الفضل يرجع دون نزاع إلى كانط فى أنه أول من لفت النظر إلى الأهمية المنطقية للعلاقات اللاتماثلية .

٢١٨ — وأعنى باختلاف الجهة ، على الأقل فى المناقشة الراهنة ، الاختلاف بين العلاقة اللاتماثلية وعكسها . ومن الحقائق المنطقية الأساسية أنه إذا فرضت أى علاقة ع ، وأى حدين ا ، ب ، أمكن تكوين قضيتين من هذين العنصرين ، الأولى تجعل العلاقة من ا إلى ب (وأسميها ا ع ب) ، والثانية (ب ع ا) تجعل العلاقة من ب إلى ا . وهاتان القضيتان هما أبداً مختلفتان ، ولو أنه فى بعض الأحيان (كما فى حالة التعدد) تستلزم كل منهما الأخرى . وفى أحوال أخرى ، مثل اللزوم المنطقى ، لا تستلزم إحداهما الأخرى ولا سلبها . على حين أنه فى أحوال ثالثة تستلزم إحداهما سلب الأخرى . ولن أتكلم عن اختلاف الجهة إلا فى الحالات من النوع الثالث . فى هذه الحالات ا ع ب تستبعد ب ع ا . ولكن هنا تنشأ حقيقة منطقية أخرى أساسية ، وهى أنه فى جميع الأحوال التى لا تستلزم ا ع ب ب ع ا ، هناك علاقة أخرى متعلقة بـ ع يجب أن تقوم بين ا ، ب . وبعبارة أخرى هناك علاقة عَ بحيث أن ا ع ب تستلزم ب عَ ا ؛ وكذلك ب عَ ا تستلزم ا ع ب . فعلاقة ع لـ عَ هى اختلاف الجهة ، وهذه العلاقة هى علاقة واحد بواحد ، ومتماثلة ، ولا متعدية ، ووجودها أصل المتسلسلات ، والتمييز بين العلامات ، وقدرٌ كبير من الرياضيات فى الواقع .

٢١٩ — وثمة سؤال ذو أهمية عظمى فى المنطق ، وبوجه خاص فى الاستنباط يمكن أن يثار بالنسبة لاختلاف الجهة . هل ا ع ب ، ب ع ا قضيتان مختلفتان فى الحقيقة ، أو أنهما يختلفان لغويا فقط ؟ فقد يمكن أن نذهب إلى أنه ليس ثمة إلا علاقة واحدة هى ع ، وأن جميع التمييزات الضرورية يمكن الحصول عليها من القضيتين ا ع ب ، ب ع ا . وقد يمكن أن يقال إن مطالب النطق والكتابة تضطرنا إلى أن نذكر إما ا أو ب أولا ، مما يخيِّل إلينا فرقا بين « ا أكبر من ب »

وبين « ب أصغر من ا » ، أما فى الحقيقة فهما قضيتان متطابقتان . غير أننا إذا اصطنعنا هذه الوجهة من النظر ، لكان من العسير علينا أن نفسر التمييز الذى لا شك فيه بين أكبر وأصغر ، لأن لكل من هاتين اللفظتين دون ريب معنى ، حتى لو لم يكن ثمة أى حدود مذكورة يتعلقان بها . ولا نزاع فى أن لهما معان مختلفة ، ولا نزاع فى أنهما علاقتان . لهذا إذا كان لا بد لنا أن نتمسك بأن « ا أكبر من ب » و « ب أصغر من ا » قضية واحدة ، فلا بد لنا من القول بأن كلا من أكبر وأصغر يدخلان فى كل من هاتين القضيتين مما يبدو ظاهر البطلان ؛ أو نقول إن ما يحصل بالفعل هو شيء مختلف عن الاثنتين ، وهو تلك العلاقة الثالثة المجردة المذكورة عن ليبنتز فيما نقلناه عنه سابقا . وفى هذه الحالة يكون الفرق بين أكبر وأصغر فرقاً فى أساسه يتطلب تعلقاً بالحدين ا ، ب . ولكن التسليم بهذه الوجهة من النظر لا يخلو من دور ، إذ ليس الأكبر أو الأصغر هو بالذات المقدم ، ولا حيلة لنا إلا أن نقول إنه حين يكون الأكبر مقدماً فالعلاقة هى أكبر ، وحين يكون الأصغر ، فالعلاقة هى أصغر . ويترتب على ذلك فيما يبدو أنه يجب التسليم بأن ع ، عَ علاقتان متميزتان . ولا مهرب لنا من هذه النتيجة بتحليل الصفات الذى حاولناه فى الباب السابق ، وذلك حين حللنا ا ع ب إلى ا β ، ب a ، ويناظر كل ب صفتان هما β ، $\bar{\beta}$ ، كما يناظر كل ا صفتان هما a ، $\bar{a}$. وهكذا إذا كانت عَ هى أكبر ، كانت a أكبر من ا » ، وكانت $\bar{a}$ « أصغر من ا » أو العكس بالعكس . غير أن الفرق بين a ، $\bar{a}$ يفترض من قبل وجود فرق بين أكبر وأصغر ، بين ع ، ع ، ولذلك لا يمكن أن يفسره . من أجل ذلك لا بد من أن يكون ع ، عَ متميزين ، وأن « ا ع ب تستلزم ب عَ ا » لابد أن يكون ستنباطا حقيقيا .

وأنتقل الآن إلى الصلة بين اختلاف الجهة وبين اختلاف العلامة . وسنجد أن اختلاف العلامة مشتق من اختلاف الجهة ، حيث أنه اختلاف لا يوجد إلا بين حدود هى إما علاقات لامتماثلة ، أو مترابطة بها . ولكننا سنجد فى حالات معينة بعض التعقيدات فى التفاصيل تتطلب مزيدا من المناقشة .

لا يتصل اختلاف العلامات تقليديا إلا بالأعداد والمقادير ، ويرتبط ارتباطا

وثيقا بالجمع. قد يقال إن وضع العلامة، عمليةٌ لا يمكن استخدامها استخداما مفيدا حيث لا يكون ثمة جمع، بل إن الجمع من بعض الوجوه قد يكون على الجملة كذلك ممكنا، حيث يمكن تمييز العلامة. ولكننا سنجد أن اختلاف العلامة ليس له صلة وثيقة بالجمع والطرح. ولكى نوضح هذه المسألة لا بد أول كل شيء أن ندرك فى وضوح أن الأعداد والمقـــادير التى ليس لها علامة، تختلف اختلافا أساسيا عن الأعداد والمقادير الموجبة. والخلط فى هذه النقطة يقضى على أى نظرية صحيحة للعلامات بالفشل.

٢٢٠ ــ إذا أخذنا أولا الأعداد المتناهية رأينا أن الأعداد الموجبة والسالبة تنشأ على النحو التالى[1]. إذا كانت ع تدل على العلاقة بين عددين صحيحين بفضلها الثانى منهما يتلو الأول، كانت القضية م ع ن مكافئة لما يُعَبر عنه عادة بقولنا م + ١ = نَ غير أن النظرية الراهنة ستطبق على المتواليات بوجه عام، ولا تتوقف على النظرية المنطقية للأعداد الأصلية التى بسطناها فى الجزء الثانى. فى القضية م ع ن يعتبر العددان م، ن خاليين تماما من العلامة، وذلك بحسب استنتاجهما من التعريف المنطقى. فإذا قلنا م ع ن، ن ع و، ثم قلنا م ع٢ و، وهكذا فى القوى الأعلى، كانت كل قوة لـ ع علاقة لا تماثلية، ومن السهل بيان أن عكسها هو نفس قوة ع، كما أنها هى نفسها قوة ع. وهكذا فإنَّ م ع ا و تكافىء و عَا م. وهاتان هما القضيتان اللتان تُكتبان عادة هكذا م + ا = و، و ــ ا = م. وهكذا فإن عا، عَا هى حقاً الأعداد الصحيحة الموجبة والسالبة، وهى مع أنها مرتبطة بـ ا إلا أنها متميزة تماماً عن ا. وعلى ذلك فى هذه الحالة نجد الترابط مع اختلاف الجهة ظاهراً ومستمراً.

٢٢١ ــ أما بالنسبة للمقادير فلا بد من التمييز بين عدة حالات. فعندنا (١) مقادير ليست علاقات، ولا امتدادات stretches (٢) امتدادات (٣) مقادير هى علاقات.

(١) المقادير من هذا الفصل ليست فى ذاتها موجبة ولا سالبة. ولكن

---

(١) سأذكر خلاصة النظرية هنا، وستبحث بشكل أكمل وأعم فى الباب الخاص بالمتواليات فقرة ٢٣٣.

مقدار ين منهما ، كما بينا فى الجزء الثالث ، يـُعـَيـِّنان إما مسافة وإما امتداداً ، والمسافة أو الامتداد تكون دائما إما موجبة أو سالبة ، كما يكونان علاوة على ذلك دائما قابليْن للجمع . ولكن لما لم تكن مقاديرنا الأصلية علاقات ولا امتدادات ، فالمقادير الجديدة التى نحصل عليها هى من نوع ٍ مختلف ٍ عن المقادير الأصلية . مثال ذلك أن الفرق بين لذتين ، أو مجموعة اللذات المتوسطة بين لذتين ، ليس لذة ؛ فهو فى الحالة الأولى علاقة ، وفى الحالة الثانية فصل ٌ .

(٢) ليس لمقادير الانقسام بوجه عام علامة ، ولكن حين تكون مقاديرَ امتدادات ٍ تكتسب علامة بطريق الترابط Correlation . ويتميز الامتداد عن المجموعات الأخرى بأنه يشتمل على جميع الحدود فى متسلسلة متوسطة بين حدين معلومين . وإذا ضم الامتداد إلى جهة من جهتى العلاقة اللامتماثلة التى لا بد من وجودها بين الطرفين النهائيين ، يكتسب الامتداد نفسه جهة ً ويصبح لا متماثلا . ومعنى ذلك أننا نستطيع التمييز بين (١) مجموعة الحدود القائمة بين ا ، ب بصرف النظر عن الترتيب ؛ (٢) الحدود من ا إلى ب ؛ (٣) الحدود من ب إلى ا . وهنا نجد أن الحالتين الثانية (٢) والثالثة (٣) معقدتان ، لأن كلا منهما يتركب من الحالة الأولى (١) ومن أحد جهتى العلاقة . ولا بد من تسمية إحداهما موجبة والأخرى سالبة . وقد جرت العادة واستعمال الجمع إلى القول بأنه حيث تتألف المتسلسلات من مقادير إذا كانت ا أصغر من ب كانت الحالة (٢) موجبة والحالة (٣) سالبة . أما حيث لا تكون المتسلسلات كما هو الأمر فى الهندسة غير مؤلفة من مقادير ، يصبح تحديد أيها موجب وأيها سالب تحكميا حسب ما نشاء . فعندنا فى كل من الحالتين نفس العلاقة بالنسبة إلى الجمع ، والتى تجرى على النحو التالى : أى زوج من المجموعات يمكن جمعهما لتكوين مجموعة جديدة ، ولكن لا يمكن جمع أى زوج من الامتدادات لتكوين امتداد ٍ جديد ؛ إذ لكى يمكن ذلك يجب أن تكون نهاية أحد الامتدادين متعاقبة مع بداية الآخر . وبذلك يمكن جمع الامتداد ا ب ، مع الامتداد ب حـ لتكوين الامتداد ا حـ . وإذا كان ا ب ، ب حـ لهما نفس الجهة ، كان ا حـ أكبر من كل ٍّ منهما . وإذا اختلفت جهتهما كان ا حـ أصغر من أحدهما . وفى هذه الحالة الثانية يعتبر جمع ا ب ،

ب حـ كطرح بين ا ب ، حـ ب ، حيث أن ب حـ ، حـ ب موجب وسالب على التوالى . وإذا كانت الامتدادات موضع بحثنا قابلة للقياس عدديا ، فجمع أو طرح مقاييسها يعطى مقياس حاصل جمع الامتدادات أو طرحها إذا كانت بحيث تسمح بالجمع أو الطرح . غير أن تقابل الإيجاب والسلب كما هو واضح يتوقف على هذه الحقيقة الجوهرية وهى أن المتسلسلة موضع البحث تنشأ عن علاقة لامتماثلة (٣) المقادير التى هى علاقات إما أن تكون علاقات متماثلة أو لا متماثلة . فى الحالة الأولى إذا كان ا حدا فى مجال إحداهما ، فالحدود الأخرى فى المجالات المتعددة يمكن أن ترتب فى متسلسلة بشرط توافر شروط معينة[١] وذلك حسب علاقاتها بالحد ا من حيث أن هذه العلاقات أكبر أو أصغر . وقد يكون هذا التنظيم مختلفاً حين نختار حدا آخر غير الحد ا . أما فى الوقت الراهن فسنفرض اختيار ا على الدوام . وحين يتم ترتيب الحدود فى متسلسلة فقد يحصل أن بعض المواضع فى المتسلسلة أو كل المواضع يشغلها أكثر من حد . ولكن فى أى حالة فإن اجتماع الحدود بين ا وبين حد آخـــر وليكن م هو اجتماع معين ، يؤدى إلى امتداد له جهتان . وعندئذ يمكننا أن نربط بين مقدار علاقة ا م ، وبين أى جهة من هاتين الجهتين ، ونحصل بذلك على علاقة لا متماثلة بين ا ، م ، وهى علاقة لها كالعلاقة الأصلية مقدار . وهكذا يمكن أن نرد حالة العلاقات المتماثلة للعلاقات اللامتماثلة . وهذه العلاقات الأخيرة تؤدى إلى العلامات ، وإلى الجمع والطرح بنفس الطريقة بالضبط التى تؤدى إليها الامتدادات ذات الجهة . والفرق الوحيد بينهما هو أن الجمع والطرح من النوع الذى سميناه فى الجزء الثالث علاقيا relational . وهكذا فى جميع أحوال المقادير ذات العلاقة يكون الاختلاف بين جهتى العلاقة اللامتماثلة منبع اختلاف العلامة .

الحالة التى ناقشناها فيما يختص بالامتدادات ذات أهمية جوهرية فى الهندسة . فهاهنا مقدار بغير علامة ، وعلاقة لا متماثلة بغير مقدار ، وارتباط ما وثيق بين الاثنين . والجمع بينهما معاً يعطى مقداراً له علامة . وجميع المقادير الهندسية ذات العلامة تنشأ على ذلك النحو . غير أننا نجد تعقيداً غريبا فى حالة الأحجام . فالأحجام كما يبدو لأول وهلة كميات لا علامة لها ، ولكنها تظهر دائما فى الهندسة

---

(١) انظر بند ٢٤٥ .

التحليلية موجبة أو سالبة . وهنا نجد العلاقات اللاامتماثلة (إذ هناك علاقتان) تظهر كحدود بينها علاقة متماثلة ، ولكنها مع ذلك لها مقابل من نوع شديد الشبه بعكس العلاقة اللامتماثلة .

٢٢٢ — الخط المستقم الوصفى هو علاقة متسلسلة بفضلها تكوّن النقطُ متسلسلةً[١] . ويمكن أن نسمى أى جهة من جهتى الخط المستقيم الوصفى شعاعا ray ، وندل على الجهة بسهم . وأى شعاعين ليسا فى مستوى واحد . فلهما إحدى علاقتين يمكن أن نسميها يمينية أو يسارية على التوالى ، وهذه العلاقة



متماثلة ولكنها غير متعدية ، وهى جوهر التمييز المألوف بين اليمين واليسار .

وهكذا تكون علاقة العمود المرتفع على خط من الشمال إلى الشرق يمينيا ، والمرتفع على خط من الجنوب إلى الشرق يساريا . ولكن مع أن العلاقة متماثلة ، إلا أنها تتغير إلى مقابلها بتغيير أى حد من العلاقة إلى عكسها . فلو فرضنا علاقة اليمين ى وعلاقة اليسار س (وهى ليست ىَ) ، فإذا كان ا ، ب شعاعين يمينيين بالتبادل ، كان ا ى ب ، آ س ب ، آ س بَ ، ا ى ب ، ب ى ا ، بَ س ا ، ب س آ ، بَ ى ا ومعنى ذلك أن كل زوج من الخطين المستقيمين اللذين ليسا فى مستوى واحد ينشأ عنهما ثمانى علاقات من هذا القبيل ، منها أربعة يمينية وأربعة يسارية. ومع أن الاختلاف بين س ، ى كما هو قائم ليس اختلاف جهة ، إلا أنه مع ذلك اختلاف إيجاب وسلب ، وهو العلة فى أن أحجام الأجسام الرباعية السطوح ، لها دائما بحسب محدداتها علامات . ولكن ليس ثمة صعوبة فى تتبع منطق الرجل العادى حين يرد اليمين واليسار للعلاقات اللامتماثلة . فالرجل العادى يأخذ أحد الشعاعين (وليكن ا) ثابتا — وإذا كان واعيا يأخذ ا عموداً رأسيا — ثم يعتبر اليمين واليسار خاصتين للشعاع المفرد ب ، أو علاقتين لأى نقطتين تحددان ب ،

---

(١) انظر الجزء السادس .

وهما تعبيران لشيء واحد . وبهذه الطريقة يصبح اليمين واليسار علاقتين لامتماثلتين بل يصبح لهما درجة محدودة من التعدى من ذلك النوع الذى بيناه فى الطريقة الخامسة لتوليد المتسلسلات (فى الباب الرابع والعشرين) . هذا وينبغى ملاحظة أننا نتخذه ثابتا يجب أن يكون شعاعاً لا مجرد خط مستقيم. مثال ذلك إذا كان مستويان غير متعامدين بالتبادل فليس أحدهما يمينا والآخر يسارا بالنسبة لخط تقاطعهما ، ولكن ذلك فقط بالنسبة لكل من الشعاعين المتعلقين بهذا الخط[١] . فإذا جعلنا هذا فى بالنا واعتبرنا المستويات الكاملة لا أنصاف المستويات فإن اليمين واليسار بطريق الشعاع المذكور يصبحان لا متماثلين ويصبح كل منهما عكس الآخر . وبذلك تكون العلامات المتصلة باليمين واليسار قائمة كجميع العلامات الأخرى على العلاقات اللاتماثلية . وهذه النتيجة يمكن اعتبارها نتيجة عامة .

٢٢٣ ــ اختلاف الجهة أعم طبعا من اختلاف العلامة ، ما دام ذلك الاختلاف موجودا فى أحوال تعجز الرياضة (على الأقل فى الوقت الحاضر) عن بحثها . ويكاد يبدو أن اختلاف العلامة قلما ينطبق على العلاقات التى ليست متعدية ، أو ليست ذات صلة وثيقة بعلاقة مَّا متعدية . فمن التناقض مثلا أن نعتبر علاقة حادثة بوقت حدوثها ، أو علاقة كمية بمقدارها ، على أنها تعطى اختلاف علامة . لأن هذه العلاقات هى التى يسميها الأستاذ شرودر erschôpft[٢] ، أى أنها إذا قامت بين ا ، ب فلا يمكن أبدا أن تقوم بين ب وبين حد ما ثالث . وبلغة الرياضة يكون مربعها صفرا . فهذه العلاقات لا ينشأ عنها اختلاف علامة .

وجميع المقادير ذات العلامة كما أدى بحثنا السابق إمَّا علاقات ، أو تصورات مركبة تدخل العلاقات فيها . ولكن ماذا نحن قائلون فى أمر أحوال التقابل العادية كالخير والشر ، اللذة والألم ، الجمال والقبح ، الرغبة والنفور ؟ أما الزوج الأخير فى غاية التعقيد ، ولو عرضنا لتحليلهما لبسطت عنهما أحكاماً أجمعت الآراء على بطلانها . أما بالنسبة للأزواج الأخرى فيبدو عندى أن تقابلها من نوع شديد

---

(١) وهذا يحتاج إلى أن الانتقال من أحد المستويين إلى الآخر يجب أن يتم بطريق إحدى الزوايا الحادة الحادثة من تقاطعهما .

(٢) انظر .Algebra der Logik, Vol III, p. 428 . هذا ويسمى الأستاذ بيرس مثل هذه العلاقات بالتى لا تتكرر

الاختلاف عن العلاقتين اللامتماثلتين المتبادلتين بالعكس ، والأولى أنهما أشبه بتقابل الأحمر والأزرق ، أو بمقدارين مختلفين من نوع واحد . وتختلف الأزواج من التقابل المذكورة آنفا عن هذه الأنواع من التقابل التى تقوم على ما يمكن تسميته باللاتوافق التركيبى[١] synthetic incompatibility ، بأن الأولى لا تشتمل إلا على حدين لامتوافقين فقط بدلا من متسلسلة بأسرها . ويقوم اللاتوافق على أن حدين هما بالطبع لا متوافقان ، لا يمكن أن يتعايشا فى نفس الموضع الزمكانى ، أو لا يمكن أن يكونا محمولين لموجود واحد . أو بوجه أعم لا يمكن أن يدخلا معاً فى قضيتين صادقتين من صورة معينة لا تختلفان إلا فى أن إحداهما تشتمل على أحد اللامتوافقين والأخرى تشتمل على الثانى . وهذا النوع من اللاتوافق (الذى ينتمى عادةً بالنسبة لفصل ما من القضايا إلى حدود متسلسلة معينة) فكرة فى غاية الأهمية فى المنطق العام ، ولكن ليس متطابقا بأى شكل مع الاختلاف بين العلاقات المتبادلة بالعكس . الواقع هذه العلاقة الأخيرة حالة خاصة لمثل هذا اللاتوافق ، ولكنها الحالة الخاصة الوحيدة التى ينشأ عنها اختلاف العلامة . وهكذا يمكن أن نُنهى مناقشتنا بأن كل اختلاف علامة ينشأ أصلا من علاقات لا متماثلة متعدية ، ثم يمتد هذا الاختلاف عنها بالترابط إلى حدود لها صلات متعددة بتلك العلاقات[٢] ولكن هذا تابع دائما للتقابل الأصلى الناشئ عن اختلاف الجهة .

---

(١) انظر كتاب « فلسفة ليبنتز » من قلم المؤلف (كمبردج ١٩٠٠) ص ١٩ — ٢٠ .

(٢) فى الاقتصاد الرياضى يمكن أن نعتبر الألم واللذة إيجاباً وسلباً دون ارتكاب خطأ منطق وذلك طبقاً للنظرية (ولا نريد الخوض فى صحتها النفسانية) القائلة بأن المرء يجب أن يأخذ أجراً على تحمله الألم ، ويجب أن يدفع أجراً للحصول على لذة . وبذلك يرتبط تقابل الألم واللذة بالحصول على المال ودفعه ، وهذا تقابل إيجاب وسلب فى مفهوم الحساب الابتدائى .

الباب الثامن والعشرون

فى الفرق بين المتسلسلات المفتوحة والمقفلة

٢٢٤ – وإذ قد بلغنا آخر الشوط فى المناقشات المنطقية البحتة عن الترتيب ، فلنوجه عنايتنا فى حرية فكر إلى الجوانب الألصق بالرياضة من الموضوع . ولما كان حل أقدم المتناقضات وأليقها بالنظر فى فكرة اللانهاية معتمداً فى أساسه على فلسفة صحيحة عن الترتيب ، فلا مناص من الخوض فى مسائل فلسفية ، لا لأنها داخلة فى موضوعنا ، بل لأن معظم الفلاسفة يظنونها كذلك . وسنحصد ما زرعنا خلال بقية هكذا الكتاب .

السؤال الذى سنعرض لمناقشته فى هذا الباب هو : هل يمكننا أن نميز فى نهاية الأمر بين المتسلسلة المفتوحة والمقفلة؟ وإن أمكننا ذلك فعلى أى أساس يقوم التمييز ؟ لقد رأينا أن جميع المتسلسات من الناحية الرياضية مفتوحة ، بمعنى أنها كلها تتولد من علاقة لا متماثلة متعدية . أما من الناحية الفلسفية فلا بد لنا من التمييز بين الطرق المختلفة التى يمكن أن تنشأ عنها هذه العلاقة . وبوجه خاص لا يجب أن نخلط بين الحالة التى لا تتطلب هذه العلاقة فيها رجوعا إلى حدود أخرى ، وبين الحالة التى تكون مثل هذه الحدود جوهرية . ومن الواضح عمليا أن ثمة فرقاً ما بين المتسلسات المفتوحة والمقفلة – مثلا بين خط مستقيم ودائرة ، أو بين تفاخر بنسب وجماعة تتقارض الثناء . ومع ذلك ليس من السهل بيان الفرق على وجه الدقة .

٢٢٥ – حيث يكون عدد الحدود فى متسلسلة متناهيا ، وتتولد المتسلسلة بالطريقة الأولى التى شرحناها فى الباب الرابع والعشرين ، فإن الطريقة التى بها نحصل على علاقة متعدية من أخرى غير متعدية نبدأ بها ، تختلف تماماً بحسب المتسلسلة أمفتوحة هى أم مقفلة ؟ . فإذا فرضنا ع العلاقة المولدة ، ں عدد الحدود فى متسلسلة ، نشأ عن ذلك حالتان . وإذا رمزنا إلى علاقة أى حد بالذى يليه إلا واحدا بالرمز ع^{٢} ، وهكذا للقوى الأعلى ، فإن علاقة ع^{ں} ليس لها إلا إحدى قيمتين : صفر والتطابق . (بفرض أن ع علاقة واحد بواحد) . لأننا إذا بدأنا

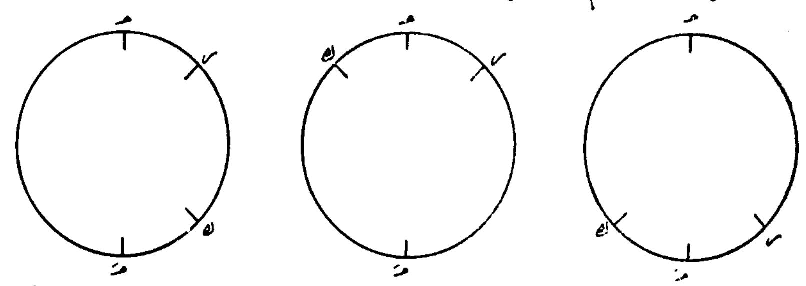
بالحد الأول ، (بفرض وجود مثل هذا الحد ، ننتهى مع عـن-١ إلى الحد الأخير ، وبذلك لا يعطى عـن حداً جديدا ، وليس ثمة حالة لعلاقة عـن . ومن جهة أخرى قد يحصل إذا بدأنا بأى حد أن يرجع بنا عـن إلى ذلك الحد مرة أخرى . وهاتان الحالتان هما البديلتان الوحيدتان الممكنتان . وفى الحالة الأولى نسمى المتسلسلة مفتوحة ، وفى الثانية نسميها مقفلة . وللمتسلسلة فى الحالة الأولى بداية ونهاية محدودتان ، وليس لها – كما هو الحال فى زوايا المضلع – حدود معينة . وفى الحالة الأولى العلاقة اللامتماثلة المتعدية هى علاقة منفصلة ، هى " قوة ع ليست أكبر من الحدود النونية ناقصا واحد ، (ن – ١) " وإذا استبدلنا بهذه العلاقة ع علاقة يمكن أن نسميها عَ تصبح متسلسلتنا من الصنف الثانى من الأصناف الستة . ولكن فى الحالة الثانية لا يمكن أن نفعل هذا الرد البسيط إلى الصنف الثانى ، لأنه فى هذه الحالة يمكن اتخاذ أى حدين من المتسلسلة وليكن ا ، م ليكونا قوة عَ أو قوة ع على حد سواء . ويصبح السؤال عن أى حدود ثلاثة بين الحدين الآخرين أمراً تحكميا تماما . وقد نستطيع الآن أن ندخل أولا علاقة الانفصال separation بين حدود أربعة. ثم بعد ذلك علاقة الحد الخامس الناتجة كما هو مبين فى الباب الخامس والعشرين . ثم بعد ذلك نعتبر ثلاثة حدود من علاقة الحدود الخمسة ثابتة . فنجد أن العلاقة الناتجة عن الحدين الآخرين متعدية ولامتماثلة . ولكن هنا اختيار الحد الأول فى متسلستنا تحكمى تماماً ، ولم يكن كذلك من قبل ، كما أن العلاقة المولدة هى فى الواقع حد واحد من خمسة لا من اثنين . ومع ذلك هناك طريقة أبسط فى الحالة التى ننظر فيها ، ويمكن توضيح هذه الطريقة بما يأتى : فى متسلسلة مفتوحة أى حدين ا ، م يعرفان جهتين يمكن وصف المتسلسلة بهما ، جهة منهما هى ا التى تأتى قبل م ، وجهة هى م تأتى قبل ا . وعندئذ يمكننا القول عن أى حدين آخرين س ، ص أن جهة الترتيب من س إلى ص هى عين جهة الترتيب من ا إلى م ، أو أنها مختلفة حسب الأحوال . وبهذه الطريقة إذا اعتبرنا ا ، م ثابتين ، س ، ص متغيرين ، نحصل على علاقة متعدية لا متماثلة بين س ، ص ناتجة من علاقة متعدية لا متماثلة قائمة بين الزوج س ، ص وبين الزوج ا ، م (أو م ، ا على حسب الحالة) . ولكن هذه العلاقة المتعدية المتماثلة يمكن بمبدأ التجريد principle of abstraction أن تحلل فنجد أنها

حاصلة على خاصية مشتركة ، وهى فى هذه الحالة أن ا ، م ثم س ، ص لهما علاقة مولدة بعين الجهة . وبذلك لا تكون العلاقة الرباعية الحدود جوهرية فى هذه الحالة . ولكن فى المتسلسلة المقفلة لا تعرف ا و م جهة المتسلسلة حتى حين يقال لنا إن ا تسبق م ، إذ يمكن أن نبدأ من ا فنصل إلى م من أى اتجاه شئنا . غير أننا إذا أخذنا حدا ثالثا ليكن ء وقررنا أن نسير من ا إلى م مارين بء فى طريقنا ، عندئذ تتحدد جهة المتسلسلة . والامتداد stretch ا ء م إنما يشتمل على جزء واحد من المتسلسلة دون الآخر . مثال ذلك يمكن أن نذهب من إنجلترا إلى نيوزيلندا إما من الشرق وإما من الغرب ، لكن إذا قررنا المرور بالهند فى الطريق فلا بد أن نذهب شرقا . ولنتأمل الآن حدا جديدا ليكن ك ، له موضع محدود فى المتسلسلة التى تبدأ من ا وتصل إلى م مارة بء ، فنجد أن ك إما أن تأتى بين ا ، ء أو بين ء ، م أو بعد م . وهكذا فإن العلاقة الثلاثية الحدود ا ، ء ، م كافية فى هذه الحالة لتوليد متسلسلة معينة تماماً . وعندئذ تقوم علاقة ڤايلاتى الخماسية الحدود على ما يأتى : أنه بالنسبة للترتيب ا ء م تأتى ك قبل (أو بعد) أى حد آخر ل من المجموعة . وليس من الضرورى أن نلجأ إلى هذه العلاقة فى الحالة الحاضرة ما دامت العلاقة الثلاثية كافية . وهذه العلاقة الثلاثية الحدود يمكن تعريفها صوريا على النحو التالى: هناك بين أى حدين من المجموعة علاقة هى قوة ع أقل من النونية . ولتكن العلاقة بين ا ، ء هى عس ، والعلاقة بين ا ، م هى عص . فعندئذ إذا كانت س أصغر من ص عيّنا جهة واحدة ل ا ء م . وإذا كانت س أكبر من ص عيّنا الجهة الأخرى . وكذلك سيكون بين ا ، ء العلاقة عَن-س ، وبين ا ، م العلاقة عن-ص . فإذا كانت س أصغر من ص ، كانت ن — س أكبر من ن —ص، وإذن كان اللاتماثل بين الحالتين مناظراً لما بين ع ، عَ . وحدود المتسلسلة ترتب ببساطة بالترابط مع عدديها س ، ص ، بحيث تسبق الأعداد الأصغر الأكبر . وهكذا لا حاجة هنا إلى العلاقة الخماسية ، ما دام كل شىء خاضعا للعلاقة الثلاثية ، وهذه بدورها ترتد إلى علاقة متعدية لا متماثلة لعددين . ولكن يبقى أن المتسلسلة المقفلة لا تزال متميزة عن المفتوحة بأن اختيار حدها الأول تحكمى .

٢٢٦ — وتنطبق مناقشة شديدة الشبه بذلك على الحالة التى تتولد فيها المتسلسلة

من علاقات ثلاثة حدود . ولكي نحتفظ بتماثل علاقة واحد بواحد مع الحالة السابقة سنضع هذه الفروض . لتكن هناك علاقة ب لحد واحد مع حدين آخرين ، ولنسمى الحد الواحد الوسط والحدين الآخرين الطرفين . ولنفرض أن الوسط لا ينفرد بالتحديد إلا حين يعلم الطرفان ، ولنفرض أن أحد الطرفين لا يتحدد إلا بواسطة الوسط والطرف الآخر . ثم لنفرض بعد ذلك أن كل حد يقع وسطا يقع كذلك طرفاً ، وأن كل حد يقع طرفا (باستثناء حالتين على الأكثر) يقع كذلك وسطا . وأخيرا إذا كانت هناك علاقة حـ وسطها ، ثم ب ، ء طرفاها . فليكن هناك دائما (فيما عدا إذا كان ب أو ء أحد الحدين الاستثنائيين الممكنين) علاقة ب هى الوسط ، حـ أحد الطرفين ، وأخرى فيها ء هى الوسط ، حـ أحد الطرفين . فعندئذ لا يقع ب ، حـ معاً إلا فى علاقتين . هذه الحقيقة تؤلف علاقة بين ب ، حـ ، ولن يكون هناك سوى حد واحد بجانب ب له هذه العلاقة الجديدة مع حـ . وبواسطة هذه العلاقة إذا كان هناك حدان استثنائيان ، أو لم يكن هناك سوى حد واحد إذا كانت المجموعة لانهائية ، فيمكن أن ننشئ متسلسلة مفتوحة . فإذا كانت العلاقة الثنائية الحدين لامتماثلة فالأمر واضح ، ولكن يمكن البرهنة على نفس النتيجة إذا كانت العلاقة الثنائية الحدين متماثلةً . ذلك أنه سيكون عند كل نهاية ولتكن ا علاقة لامتماثلة لـ ا مع الحد الوحيد الذى هو وسط بين ا وبين حد آخر مّا . وهذه العلاقة إذا ضربت فى القوة النونية للعلاقة الثنائية الحدين . حيث ن + ١ هو أى عدد صحيح أصغر من عدد حدود المجموعة ، أعطت علاقة تقوم بين ا وبين عدد (لا يزيد على ن + ١) من حدود المجموعة ليس فيها سوى حد واحد فقط هو بحيث لا يعطى أى عدد أصغر من ن علاقة ا مع هذا الحد . وبذلك نحصل على ترابط لحدودنا مع الأعداد الطبيعية natural التى تولد متسلسلة مفتوحة فيها ا أحد طرفيها . أما من ناحية أخرى إذا لم يكن لمجموعتنا حدود استثنائية ولكنها متناهية ، فسنحصل عندئذ على متسلسلة مقفلة . ولنفرض أن علاقتنا الثنائية الحدين هى ق ، ولنفرض أولا أنها متماثلة . (إنها متماثلة إذا كانت علاقتنا الأصلية الثلاثية الحدود متماثلة بالنسبة للأطراف . عندئذ كل حد حـ من مجموعتنا سيكون له العلاقة ق لحدين آخرين لهما بالنسبة لبعضهما العلاقة $ق^{2}$. وفى جميع العلاقات من صورة $ق^{ن}$ تقوم بين حدين معلومين سيكون هناك علاقة م هى الأصغر وهذه هى التى يمكن

تسميتها العلاقة الرئيسية للحدين . ولنفرض أن عدد حدود المجموعة ن . عندئذ سيكون لكل حد من المجموعة علاقة أساسية وس لكل حد آخر ،حيث أن س هو عدد صحيح مـَّا ليس أكبر من ن/٢ . فإذا فرضنا أى حدين ح ، ر من المجموعة ، بشرط ألا يكون عندنا ح و ن/٢ ر (وهى حالة لا تنشأ إذا كان ن فرديا) فلنفرض وجود ح وس ر ، حيث أن س أصغر من ن/٢ . وهذا الفرض يعرف جهةً للمتسلسلة يمكن أن نوضحها كالآتى : إذا فرضنا ح وص ك ، حيث ص أصغر أيضا من ن/٢ ، فيمكن أن تنشأ ثلاث حالات بفرض أن ص أكبر من س . فقد نحصل على ر وص-س ك ، أو إذا كان س + ص أصغر من ن/٢ فقد نحصل على ر وس+ص ك أو إذا كانت س + ص أكبر من ن/٢ فقد نحصل على ر و ن/٢-س-ص ك ، (ونحن نختار دائما العلاقة الرئيسية) . وهذه الحالات الثلاث موضحة بالرسم كما يلى :



ونقول فيما يختص بهذه الحالات الثلاث إنه بالنسبة للجهة ح ر (١) ك تأتى بعد ح ، ر وفى (٢) ، (٣) ك تأتى قبل ح ، ر. وإذا كانت ص أصغر من س ، وكان ك وس-ص ر ، فسنقول إن ك توجد بين ح ، ر فى اتجاه ح ر . فإذا كان ن عددا فرديا شمل ذلك جميع الأحوال ، أما إذا كان زوجا فعلينا أن ننظر فى الحد ح فنجد أنه بحيث يكون ح و ن/٢ حَ . وهذا الحد هو إن شئت أن تقول مقابل بالقطب antipodal ل ح . ويعرف بأنه أول حد فى المتسلسلة حين نأخذ بمنهج التعريف سالف الذكر . وإذا كان ن فردياً كان الحد الأول هو ذلك الحد من الفصل (٣) الذى تكون فيه ح و (ن-١)/٢ ك ، وبذلك تكتسب المتسلسلة ترتيبا معينا ، ولكن اختيار الحد الأول كجميع المتسلسلات المقفلة تحكمى .

٢٢٧ ـ الحالة الوحيدة الباقية هـ تلك التى تبدأ من علاقات رباعية الحدود ويكون للعلاقة المولدة خمسة حدود على التحديد . وهذه هـ حالة الهندسة الإسقاطية التى نجد فيها أن المتسلسلة هى بالضرورة مقفلة ، أى عند اختيار حدودنا الثلاثة الثابتة للعلاقة الخماسية الحدود ، فليس ثمة أى قيد لاختيارنا ، ويمكن أن يعرف أى واحد من هذه الثلاثة بأنه الأول .

٢٢٨ ـ الخلاصة : كل متسلسلة من حيث إنها متولدة من علاقة متعدية لاممّاثلة بين أى حدين من المتسلسلة ، فهى مفتوحة عندما لا يكون لها بداية ، أو كان لها بداية ليست تحكمية . وتكون مقفلة حين يكون اختيار بدايتها تحكميا . فإذا كانت ع هى العلاقة المكونة كانت بداية المتسلسلة حدا له العلاقة ع لا العلاقة عَ . وحيث تكون ع علاقة أصلية ثنائية الحدين ، فيجب أن تكون البداية إن وجدت معينة تماماً . ولا يمكن أن تكون البداية تحكمية إلا حين تتطلب ع حدا ما آخر (يمكن أن يعتبر ثابتا) بجانب الحدين اللذين تكون العلاقة بالنسبة لهما متعدية ولا متماثلة (وعلينا أن نعتبر الحدين متغيرين) . يترتب على ذلك أنه فى جميع أحوال المتسلسلات المقفلة يجب أن تكون العلاقة المتعدية اللاممّاثلة علاقة تتطلب حدا ثابتا أو أكثر من حد ثابت بالإضافة إلى الحدين المتغيرين . على الرغم من وجود علاقة واحد بواحد لا متماثلة إذا كانت المتسلسلة منفصلة discrete . هذا ولو أن كل متسلسلة مقفلة يمكن رياضيا أن تقلب مفتوحة ، وكل متسلسلة مفتوحة يمكن أن تصبح مقفلة ، إلا إنه يوجد بالنسبة لطبيعة العلاقة المولدة تمييز حقيقى بينهما ، ولكنه مع ذلك تمييز أهميته أدنى إلى أن تكون فلسفية منها رياضية .

الباب التاسع والعشرون

المتواليات والأعداد الترتيبية

٢٢٩ ــ حان الآن الوقت أن ننظر فى أبسط أصناف المتسلسلات اللامتناهية ، نعنى تلك التى تنتمى إليها الأعداد الطبيعية natural ذاتها . وسأرجئ إلى الجزء التالى البحث فى جميع الصعوبات المفروضة الناشئة عن لا نهائية مثل هذه المتسلسلات ، مقتصرا ههنا على بسط النظرية الأولية عنها فى صورة لا تفترض الأعداد[1] .

المتسلسلات التى نبحثها الآن هى تلك التى يمكن أن ترتبط حدا بحد مع الأعداد الطبيعية دون حاجة إلى أى تغيير فى ترتيب الحدود . ولكن لما كانت الأعداد الطبيعية حالة خاصة لمثل تلك المتسلسلات ، وكان فى الإمكان استنباط جميع الحساب والتحليل من أى واحدة من هذه المتسلسلات دون رجوع إلى العدد ، فقد يحسن أن نقوم بتعريف المتواليات التى لا تتطلب أى رجوع للعدد .

المتوالية متسلسلة منفصلة ، ذات حدود متعاقبة ، لها بداية ولكن ليس لها نهاية ، ولها أيضا اتصال . وكنا قد فسرنا معنى الاتصال فى الباب الرابع والعشرين ، غير أننا لا نستطيع أن نقدم هذا التفسير الآن . وبوجه عام إذا كانت المتسلسلة غير متصلة انقسمت إلى جزأين أو أكثر كل منها متسلسلة قائمة بذاتها . فالأعداد واللحظات كلاهما يكوّن متسلسلة غير متصلة ، وكذلك الخطان المستقيمان المتوازيان . وحيث تنشأ المتسلسلة أصلا بواسطة علاقة متعدية لا متماثلة فيمكن التعبير عن الاتصال بهذا الشرط ، وهو أن أى حدين من متسلسلتنا يجب أن تكون لهما العلاقة المولدة . ولكن المتواليات فهى متسلسلات من النوع الذى يمكن أن يتولد بالطريقة الأولى من الطرق الست ، أى بعلاقة واحد بواحد لا متماثلة . ولكى ننتقل من هذه العلاقة إلى علاقة متعدية استخدمنا من قبل العدد ،

---

(١) الباب الحالى يحازى تماماً حساب بيانو . انظر Formulaire de Mathématique. Vol. II, § 2. وقد بحثت هذا الموضوع من الناحية الرياضية فى مجلة RdM. Vols. VII and VIII ويرجع الموضوع أساساً إلى ديديكند وجورج كانتور .

معرفين العلاقة المتعدية بأنها : أى قوة لعلاقة الواحد بالواحد .وهذا التعريف لا يصلح الآن ما دمنا سنستبعد الأعداد . ومن مفاخر الرياضة الحديثة أنها استطاعت الملاءمة بين مبدأ قديم وبين مطالب هذه الحالة .

والتعريف المطلوب علينا أن نحصل عليه بالاستنباط الرياضى . فالمبدأ الذى كان يعتبر عادة كمجرد حجة لتوضيح نتائج لا سبيل إلى البرهنة عليها بأى دليل آخر ، أصبح الآن أوثق فحصا . فتبين الآن أنه المبدأ الذى يعتمد عليه قانون التبادل وإحدى صور قانون التوزيع[1] ، وذلك بمقدار ما يتصل بالأعداد الترتيبية . وهذا المبدأ الذى يفسح للمتناهى أوسع مدى ممكن ، هو العلامة المميزة للمتواليات . ويمكن تقريره على النحو الآتى :

إذا علم أى فصل من حدود هـ الذى ينتمى إليه الحد الأول من أية متوالية والذى ينتمى إليه حد المتوالية الما بعد next after أى حد من المتوالية المنتمية لـ هـ ، إذن كل حد من المتوالية ينتمى لـ هـ .

ويمكن صياغة المبدأ عينه فى صورة أخرى . ليكن φ (س) دالة قضية تصبح قضية محدودة متى علمت س . إذن φ (س) دالة س ، وتكون بوجه عام صادقة أو كاذبة بحسب قيمة س . فإذا كان س عضوا فى متوالية ، فليكن س دالاً على ما بعد س . وليكن φ (س) صادقا حين يكون س أول حد فى متوالية معينة ، وليكن φ (عقب س) صادقا كلما كان φ (س) صادقا ، حيث س أى حد فى المتوالية . فيترتب على ذلك بمبدأ الاستنباط الرياضى أن φ (س) صادق دائما ، إذا كان س أى أى حد فى المتوالية المذكورة .

والتعريف الكامل للمتوالية هو ما يأتى : ليكن ع أى علاقة واحد بواحد لا متماثلة ؛ ى فصل بحيث يكون لكل حد من ى العلاقة ع لحد ما ينتمى كذلك للفصل ى . وليكن هناك على الأقل حد واحد من الفصل ى ليس له العلاقة ع لأى حد من ى . وليكن هـ أى فصل ينتمى له على الأقل أحد حدود ى ، وينتمى له كذلك كل حد من ى له العلاقة ع̆ لحد ما ينتمى لكلا ى، ى . وليكن ى بحيث

---

(١) هذه الصورة هى $(ا + \beta)\gamma = ا\beta + ا\gamma$. والصورة الأخرى وهى $ا(\beta + \gamma) = ا\beta + ا\gamma$ تصح كذلك على الأعداد الترتيبية اللانهائية ، فتكون بذلك مستقلة عن الاستنباط الرياضى .

يكون داخلا تماماً تحت أى فصل هـ يحقق الشروط السابقة . إذن ى ، مرتبا هذا الترتيب بالعلاقة ع ، فهو متوالية[1] .

٢٣٠ – ويمكن إثبات أنّ كل شىء عن هذه المتواليات له صلة بالحساب المتناهى . فنبين أولا أنه لا يمكن وجود إلا حد واحد من ى ليس له العلاقة عَ بأى حد من ى . ثم نعرف بعد ذلك الحد الذى له العلاقة ع مع س‍ بأنه التالى ا س‍ (من حيث أن س‍ هى ى) والذى يكتب أنه عقب س‍ . وبذلك يمكن بسهولة أن نعلم التعريفات وخصائص الجمع والطرح والضرب والقسمة ، والحدود الموجبة والسالبة ، والكسور المنطقة rational fractions ، ويسهل بيان أنه بين أى كسرين منطقين كسر ثالث دائما . ومن هذه النقطة يسهل التقدم إلى اللامنطقات والأعداد الحقيقية real. .

وبصرف النظر عن مبدأ الاستنباط الرياضى ، فما يهمنا أساساً عن هذه العملية أنها تبين أن الخواص الوحيدة المتسلسلة أو الترتيبية للأعداد المتناهية مستخدمة فى الرياضيات العادية . وهى الخواص التى يمكن تسميتها بالخواص المنطقية الخارجة تماماً عن الموضوع . وأعنى بالخواص المنطقية للأعداد تعريفها بأفكار منطقية بحتة . هذه العملية التى وضحناها فى الجزء الثانى يمكن أن نقدم لها ههنا موجزا مختصرا ، فنقول : يتبين أولا أن علاقة الواحد بالواحد يمكن أن تقوم بين أى فصلين صفر ، أو بين أى فصلين ى ، ف وهما بحيث إذا كان س‍ هو ى ، سَ‍ يختلف عن س‍ ، فإن سَ‍ لا يمكن أن يكون ى . والأمر كذلك فى ف . وإمكان مثل هذا الترابط بين الواحد بالواحد هو الذى نسميه تشابه فصلين ى . ف . والتشابه similarity من جهة أنه متماثلٌ ومتعد يجب أن يكون قابلا للتحليل (بمبدأ التجريد) إلى حصوله على خاصية مشتركة ، وهى التى نعرفها بأنها عدد أى فصل من الفصلين . وحين يكون للفصلين ى ،ف الخاصية المذكورة فإننا نقول إن عددهما واحد ، وكذلك فى الأعداد الأعلى . والتعريف العام للأعداد المتناهية يتطلب

---

(١) ينبغى ملاحظة أن المتسلسلة المفتوحة المنفصلة المتولدة بعلاقة متعدية يمكن دائماً ردها كما رأينا فى الباب السابق إلى علاقة متولدة عن علاقة واحد بواحد لا متماثلة ، ولكن ذلك إنما بشرط أن تكون المتسلسلة إما متناهية أو متوالية .

(٢) انظر مقالتى عن منطق العلاقات فى مجلة RdM, VII

الاستنباط الرياضى ، أو لا تشابه الكل والجزء ، ولكنه يعطى دائماً فى صيغة منطقية بحتة .

والأعداد معرفةً على هذا النحو هى التى تستخدم فى الحياة اليومية ، وهى الجوهرية فى أى قول عن الأعداد . وأن يكون للأعداد هذه الخواص المنطقية هو مصدر أهميتها . ولكن الحساب العادى لا يستخدم هذه الخواص التى يمكن أن تعرى الأعداد عنها دون أى مساس بصدق الحساب والتحليل . فالمطلوب فى الرياضة إنما هو أن الأعداد المتناهية تكوّن متوالية . وهذا هو السبب فى أن الرياضيين — مثل هلمهولتز وديديكند وكرونكر — قد ذهبوا إلى أن الأعداد الترتيبية متقدمة على الأصلية cardinals ، لأن الخواص الترتيبية للأعداد هى وحدها الداخلة فى الموضوع . ولكن النتيجة القائلة بأن الترتيبيات متقدمة على الأصليات يبدو أنها نشأت من خلط . ذلك أن الترتيبيات والأصليات هما على حد سواء متوالية ، ولهما بالضبط عين الخواص الترتيبية . ويمكن إثبات جميع الحساب ابتداءً من أى منهما دون رجوع للآخر ، من حيث أن قضاياهما متطابقة رمزيا ، ولكن مختلفة فى المعنى . ولكى نثبت أن الترتيبيات متقدمة على الأصليات ، لا بد من بيان أن الأصليات إنما يمكن تعريفها بصيغة الترتيبيات . وهذا باطل لأن التعريف المنطقى للأصليات مستقل تماماً عن الترتيبيات[1] . ويبدو فى الحقيقة أنه لا وجه فى الاختيار فيما يختص بالتقدم المنطقى بين الترتيبيات والأصليات ، سوى أن وجود الترتيبيات مستنبط من متسلسلة الأصليات . وكما سنرى فى الفقرة التالية يمكن تعريف الترتيبيات دون رجوع إلى الأصليات ، ولكنها حين تعرف يتضح أنها تستلزم الأصليات . وبالمثل يمكن تعريف الأصليات دون الرجوع إلى الترتيبيات ، ولكنها فى جوهرها تكوّن متوالية ، وجميع المتواليات كما سنبين فيما بعد تستلزم بالضرورة الترتيبيات .

٢٣١ — لم نستطع حتى الآن تحليل الترتيبيات تحليلا صحيحا ، بسبب التحيز الشائع ضد العلاقات . فالناس يتحدثون عن المتسلسلة باعتبار أنها تشتمل على حدود معينة مأخوذةً فى ترتيب معين ، وتنطوى هذه الفكرة بوجه عام على عنصر نفسانى . فجميع المجموعات من الحدود لها بصرف النظر عن الاعتبارات النفسانية كل ضروب من الترتيب هى قادرة عليه ، أى أن لها علاقات متسلسلة ذات مجالات هى منظومة معطاة من الحدود ، وهذه العلاقات تنظم تلك الحدود فى أى ترتيب ممكن

(١) لقد اعترف الأستاذ بيانو الذى كان معصوماً بشكل نادر عن الخطأ بهذه الحقيقة . انظر Formulaire, 1898, note (p. 39).

وفى بعض الأحوال تكون علاقةٌ متسلسلةٌ أو أكثر هى الغالبة بوجه خاص ، إما بسبب بساطتها أو أهميتها . مثال ذلك أن ترتيب المقدار بين الأعداد ، أو ترتيب القبل والبعد بين اللحظات ، يظهر أنه بكل تأكيد الترتيب « الطبيعى » ، وأن أى ترتيب آخر يبدو أنه يقحم صناعيا بمحض إرادتنا . وهذا خطأ محض ؛ لأنه لا يمكن أن نهب الحدود ترتيبا ليس لها من قبل . والأمر النفسانى هو « اعتبار » هذا الترتيب أو ذاك . فنحن حين نقول إننا نرتب منظومة من الحدود فى أى ترتيب شئنا ، فالذى نعنيه فى الواقع أننا نستطيع اعتبار أى علاقات متسلسلة للمنظومة المعطاة مجالها ، وأن هذه العلاقات المتسلسلة ستعطى فيما بينها توافيق من القبل والبعد متفقة مع التعدى والارتباط . ويترتب على ذلك أن الترتيب إذا شئنا الدقة فى التعبير ليس خاصة لمنظومة معلومة من الحدود ، بل لعلاقة متسلسلة مجالها هو المنظومة المعطاة . فإذا أعطيت العلاقة أعطيت معها مجالها ، ولكن إذا أعطى المجال فلا تعطى العلاقة بأى حال . وفكرة منظومة من الحدود فى ترتيب معلوم ، هى فكرة منظومة من الحدود معتبرة على أنها مجال علاقة متسلسلة معطاة . ولكن اختبار الحدود أمر زائد عن الحاجة ، ويكفى جداً اعتبار العلاقة وحدها .

يمكن إذن أن نعتبر العدد الترتيبى خاصةً مشتركة لمنظومات من العلاقات المتسلسلة التى تولد ترتيبيا متسلسلات متشابهة . ومثل هذه العلاقات هى التى سأسميها « الشَبَه » likeness ، أى إذا كان ق ، ك هما مثل هاتين العلاقتين فإن مجاليهما يمكن أن يترابطا حدا بحد ، إلى درجة أن حدين بين أولهما علاقة ق مع ثانيهما ، سيرتبطان مع حدين للأول منهما علاقة ك مع الثانى ، والعكس بالعكس. وهنا ، كما فى حالة الأعداد الأصلية ، يمكن بمقتضى مبدأ التجريد أن نعرف العدد الترتيبى لعلاقة متسلسلة متناهية معطاة ، بأنه فصل مثل هذه العلاقات . ومن السهل بيان أن العلاقات المولدة للمتواليات متشابهة جميعا . وفصل مثل هذه العلاقات سيكون العدد الترتيبى للأعداد الصحيحة المتناهية فى ترتيب المقدار . وعندما يكون الفصل متناهيا فجميع المتسلسلات التى يمكن أن تتكون من حدود متشابهة ترتيبيا ، ومختلفة ترتيبيا عن متسلسلات لها عدد أصلى من الحدود مختلف. ومن ثم فهناك مايربط واحد بواحد للترتيبيات والأصليات المتناهية ، وليس

لها مثيل بالنسبة للأعداد اللامتناهية ، كما سنرى فى الجزء الخامس . نستطيع إذن تعريف العدد الترتيبي ن بأنه فصل العلاقات المتسلسلة التى تشتمل ميادينها domains على ن من الحدود ، حيث ن عدد أصلى متناه . ومن الضرورى أن نتخذ هنا الميادين بدلا من المجالات fields ، إلا إذا استبعدنا العدد ١ ، إذ لا علاقة تستلزم التعدد يمكن أن يكون لها حد واحد فى مجالها ، على الرغم من أنها يمكن ألا يكون لها أى حد . ولهذا مضايقة عملية بسبب أن ن + ١ لا بد من الحصول عليها بإضافة حد « واحد» إلى المجال . والنقطة التى أثرناها تشمل الاصطلاحات والرموز على حد سواء ، وليس لها أى أهمية فلسفية .

٢٣٢ — التعريف المذكور سابقا للأعداد الترتيبية مباشر وبسيط ، ولكنه لا يعطى فكرة النونية المعتبرة فى العادة أنها هى العدد الترتيبي . وهذه الفكرة أشد تعقيدا : فأى حد ليس فى حد ذاته العدد النونى ، ولا يصبح كذلك بمجرد تخصيص ن — ١ لحدود أخرى . بل الحد هو النونى بسبب علاقة متسلسلة معينة ؛ وهذا هو تعريف العدد النونى ، وهو يبين أن هذه الفكرة نسبية ليس فقط بالنسبة لسابقاتها بل لعلاقة متسلسلة متخصصة كذلك . ويمكن بالاستنباط تعريف الترتيبيات المتناهية المختلفة دون ذكر الأصليات . والعلاقة المتسلسلة المتناهية هى علاقة لا تشبه (بالمعنى المذكور سابقا) أى علاقة تستلزمها ، ولكنها لا تكافئها . والعدد الترتيبي المتناهى هو عدد يشتمل على علاقات متسلسلة متناهية . فإذا كان ن عدداً ترتيبيا متناهيا ، كان ن + ١ عدداً ترتيبيا ، بحيث أننا إذا حذفنا الحد الأخير[1] من متسلسلة من الصنف ن + ١ ، كان الباقى فى نفس الترتيب من صنف ن . وبلغة أكثر فنية ، العلاقة المتسلسلة من الصنف ن + ١ هى علاقة حين تقتصر على ميدانها لا على مجالها تصبح من الصنف ن . وهذا يعطى بالاستنباط تعريف كل عدد ترتيبي متناه خاص دون أن تذكر فيه الأصليات أبدا . وهكذا لا يمكن القول إن الترتيبات تفترض فى أساسها الأصليات ، ولو أنها أكثر تعقيدا ، ما دامت تفترض كلا من علاقة الواحد بالواحد والعلاقة المتسلسلة ، على حين أن الأصليات

(١) الحد الأخير من متسلسلة (إذا وجد) هو الحد الذى ينتمى لعكس الميدان ، ولكن لا إلى ميدان العلاقة المولدة ، أى الحد الذى يكون بعد لا قبل الحدود الأخرى .

لا تفترض إلا علاقة الواحد بالواحد .

ويمكن إعطاء عدة تعريفات مكافئة لذلك للعدد الترتيبي الخاص بالترتيبيات المتناهية فى ترتيب المقدار . ومن أبسط التعاريف أن هذا العدد ينتمى لأى علاقة متسلسلة ، هى بحيث أن أى فصل يحتويه مجالها ولا يكون صفرا ، فله حد أول ، على حين أن كل حد من المتسلسلة له تال مباشر . وكل حد ما عدا الأول له سابق مباشر . ومرة ثانية الأعداد الأصلية ليست هنا مفروضة من قبل بأى حال .

وقد أخذنا العلاقات المتسلسلة خلال المناقشات السابقة على أنها متعدية لا علاقات واحد بواحد. لأن علاقات الواحد بالوحد يسهل أن تشتق من العلاقات المتعدية ، بينما الاشتقاقات العكسية معقدة بعض الشيء . وعلاوة على ذلك فإن علاقات الواحد بالواحد لا تصلح إلا لتعريف المتسلسلات المتناهية ، وبذلك لا يمكن أن يشمل استخدامها بحث المتسلسلات اللانهائية ، إلا إذا أخذت على أنها مشتقة من المتعديات .

٢٣٣ — ولعل هذا موضع ذكر بعض كلمات عن الترتيبيات الموجبة والسالبة . إذا حذفت الحدود الأولى التى عددها ى من متوالية (حيث ى أى عدد متناه) فلا يزال الباقى يكوّن متوالية . وبالنسبة للمتوالية الجديدة فقد يمكن أن تعين الترتيبيات السالبة للحدود المحذوفة . ولكن من المناسب لهذا الغرض اعتبار بداية المتوالية الأصغر على أنها الحد الصفرى (أى الحد الذى ترتيبه الصفر) . ولكى نحصل على متسلسلة تعطى أى عدد ترتيبى موجب أو سالب ، نحتاج إلى ما يمكن أن نسميه بالمتوالية المزدوجة double progression. . والمتوالية المزدوجة متسلسلة من شأنها أننا إذا اخترنا منها أى حد س ، نشأ عن هذا الحد متواليتان ، إحداهما متولدة من العلاقة المتسلسلة ع ، والأخرى من ع . وسنعين ل س العدد الترتيبى ٠ ، وسنعين للحدود الأخرى أعداداً ترتيبية موجبة أو سالبة بحسب انتماء أى منهما لأى واحدة من المتواليتين البادئتين من س أما الترتيبات الموجبة والسالبة ذاتها فإنها تكون مثل هذه المتوالية المزدوجة . وهى تعبر أساساً عن علاقة بالأصل المختار تحكميا من المتواليتين ، ويعبر + ى ، — ى عن علاقتين متعاكستين بالتبادل . وبذلك يكون لهما جميع الخواص التى رأينا فى الباب السابع والعشرين أنها تميز الحدود ذات العلامات.

الباب الثلاثون

نظرية ديديكند عن العدد

٢٣٤ – ترجع أساساً نظرية المتواليات والترتيبات التى بحثناها فى الباب السابق إلى رجلين هما ديديكند وكانتور . ولما كانت مساهمات كانتور تختص بوجه خاص باللانهاية فلا حاجة بنا إلى بحثها فى الوقت الحاضر ، وكذلك نؤجل البحث فى نظرية ديديكند عن اللامنطقات . أما نظريته عن الأعداد الصحيحة فهى التى أود الآن بحثها ، وهى النظرية المبسوطة فى كتابه Was sind und was sollen die zahlen ولن أتقيد عند عرضى لهذا الكتاب بعبارات ديديكند بالضبط ، إذ يبدو أنه فى الوقت الذى كتب فيه مؤلفه لم يكن على علم بالمنطق الرمزى . ومع أنه اخترع الشىء الكثير من هذا الموضوع مما يدخل فى صميم غرضه ، إلا أنه كان من الطبيعى أن يصطنع عبارات غير مألوفة ، ولم تكن دائماً مناسبة تماماً مناسبة مثيلاتها المصطلح عليها .

وهذه هى الأفكار الأساسية فى الكتاب المذكور[٢] : – ١ – تمثيل abbildung النظام (٢١) ؛ – ٢ – فكرة السلسلة chain (٣٧) ؛ – ٣ – سلسلة عنصر (٤٤) – ٤ – الصورة المعممة للاستنباط الرياضى (٥٩) ؛ – ٥ – تعريف النظام اللانهائى المفرد (٧١) . ويستنبط ديديكند من هذه الأفكار الخمسة الأعداد والحساب العادى . ولنشرع أولا فى تفسير هذه الأفكار ثم نفحص عن الاستنتاج .

٢٣٥ – (١) إن تمثيل فصل مَّا ى هو قانون به يكون لكل حد من حدود ى وليكن س مثلا ، حد واحد لا غير مناظر φ (س) . ولا نفترض فى هذا أولا هل φ (س) تتبع الفصل ى ، أو φ (س) قد تكون عين φ (ص) إذا كان س ، ص حدين مختلفين من حدود ى . وبهذا يمكن أن يصاغ التعريف على النحو الآتى :

---

(١) الطبعة الثانية برنشفيك ١٨٩٣ (الطبعة الأولى ١٨٨٧) . ومحتويات هذا الكتاب المعبر عنه بجبر العلاقات موجود فى مقالتى فى مجلة RdM, VII, 2, 3.

(٢) الأرقام الموجودة بين قوسين لا تشير إلى الصفحات بل إلى الفقرات المقسم الكتاب إليها .

إن تمثيل representation فصل ى هو علاقة كثير بواحد يشتمل ميدانه على ى الذى حدوده قد تنتمى أو لا تنتمى إلى ى ، ويترابط كل حد من حدوده بحدود ى [١]. ويكون التمثيل مشابهاً إذا كان س يختلف عن ص ، وكلاهما ينتمى إلى ى ، عندئذ φ (س) يختلف عن φ (ص) ؛ أى عندما تكون العلاقة المذكورة علاقة واحد بواحد . وديديكند يبين أن التشابه بين الفصول منعكس ومتماثل ومتعد ، ويلاحظ (٣٤) أن الفصول يمكن تصنيفها بالتشابه مع فصل معلوم — وهذا إيحاء بفكرة أساسية فى مباحث كانتور .

٢٣٦ — (٢) إذا وجدت علاقة ، سواء أكانت علاقة واحد بواحد أم كثير بواحد ، لا ترتبط مع الفصل ى إلا بحدود تنتمى إلى ذلك الفصل ، فإن هذه العلاقة يقال عنها إنها تكون تمثيلا ل ى فى ذاته (٣٦) ، وبالنسبة لهذه العلاقة يسمى ى سلسلة (٣٧) بعبارة أخرى أى فصل ى فهو سلسلة بالنسبة لأى علاقة كثير بواحد إذا كان ى داخلا فى ميدان العلاقة ، وأن المترابط مع ى هو دائماً ى ذاته . ومجموع مترابطات correlates فصل يسمى « صورة » Bild الفصل . وهكذا فإن السلسلة هى فصل صورته جزء أو كل نفسه . ولفائدة القارئ غير الرياضى يحسن ملاحظة أن السلسلة بالنسبة لعلاقة واحد بواحد لا يمكن أن تكون متناهية بشرط أن يكون لها أى حد لا ينتمى إلى صورة السلسلة ، لأن مثل هذه السلسلة يجب أن تشتمل على نفس عدد الحدود كجزء صحيح proper part من ذاتها [٢] .

٢٣٧ — (٣) إذا كان ا أى حد أو أى مجموعة من الحدود ، فقد يكون هناك بالنسبة لعلاقة كثير بواحد معلومة سلاسل كثيرة تشتمل على ا . والجزء المشترك بين جميع هذه السلاسل ، والذى يدل عليه قولنا ا . ، هو ما يسميه ديديكند سلسلة ا (٤٤) . مثال ذلك إذا كان ا هو العدد ن ، أو أى منظومة من الأعداد

---

(١) علاقة كثير بواحد هى علاقة شبيهة بعلاقة كمية بمقدارها . وهذه العلاقة فيها الحد الأيمن الذى تتجه إليه العلاقة ، لا يتحدد إلا حين يعلم الحد الأيسر . أما هل العكس صحيح فأمر تركه بغير أى يفصل فيه . وهكذا علاقة واحد بواحد هى حالة خاصة من علاقة كثير بواحد .

(٢) قوله جزء صحيح Echter Theil عبارة تشبه قولنا كسر صحيح Proper fraction ، وتدل على الجزء لا الكل .

ن أقلها ، كانت سلسلة ١ بالنسبة للعلاقة أصغر من « ١ » هى جميع الأعداد التى لا تقل عن ن .

٢٣٨ – (٤) ثم يشرع ديديكند (٥٩) فى بسط نظرية هى صورة معممة للاستنباط الرياضى . وتجرى النظرية على النحو التالى : ليكن ١ أى حد أو أى منظومة من الحدود يشتمل عليها الفصل س ، ولتكن صورة الجزء المشترك بين س وبين السلسلة ١ يحتويها أيضاً س . فيترتب على ذلك أن السلسلة ١ يحتويها س . هذه النظرية المعقدة بعض الشئ يمكن أن تصبح أوضح إذا صيغت بعبارة أخرى . فلنسم العلاقة التى تتولد السلسلة عنها (أو الأولى عكس هذه العلاقة) تتابعاً ، بحيث يكون المترابط أو الصورة هو التالى للحد . وليكن ١ حداً له تال أو مجموعة من مثل هذه الحدود . فالسلسلة بوجه عام (بالنسبة للتتالى) ستكون أى منظومة من الحدود بحيث ينتمى تالى أى حد منها للمنظومة . وستكون سلسلة ١ الحد المشترك لجميع السلاسل المشتملة على ١ . ولكن منطوق النظرية يخبرنا أن ١ متضمنة فى س ، فإذا كان أى حد من سلسلة ١ هو س ، فكذلك تاليه . والنتيجة هى أن كل حد فى السلسة ١ هو س . هذه النظرية كما هو واضح شبيهة جداً بالاستنباط الرياضى ، ولكنها تختلف عنه أولا بأن ١ ليس من الضرورى أن يكون حداً مفرداً ، وثانياً بأن العلاقة المكونة لا يجب أن تكون علاقة واحد بواحد ، بل قد تكون علاقة كثير بواحد . ومما هو جدير بالاعتبار حقاً أن فروض ديديكند السابقة تكفى للبرهنة على هذه النظرية .

٢٣٩ – (٥) وأنتقل إلى تعريف النظام اللانهائى المفرد أو الفصل (٧١) . فهو يعرفه بأنه فصل يمكن أن يمثل فى ذاته بواسطة علاقة واحد بواحد ، ثم يمتد بحيث يصبح سلسلة لحد مفرد من الفصل لا تشتمل عليه صورة الفصل ، وذلك بالنسبة لعلاقة الواحد بالواحد المذكورة . فإذا سمينا الفصل ل ، وعلاقة الواحد بالواحد ع ، نشأ عن ذلك فيما يلاحظ ديديكند أربع نقط فى هذا التعريف . (١) صورة ل متضمنة فى ل ، أى كل حد له العلاقة ع مع ل فهو ل (٢) ل سلسلة حد من حدوده (٣) هذا الحد الواحد هو بحيث أنه لا ل له العلاقة ع معه ، وبعبارة أخرى ليس صورة أى حد آخر من ل (٤) العلاقة ع هى علاقة واحد بواحد ،

وبعبارة أخرى التمثيل متشابه similar . والنظام المجرد معرفاً بأنه حاصل على هذه الخواص ، يعرفه ديديكند بأنه الأعداد الترتيبية (٧٣) . ومن الواضح أن نظامه اللانهائى المفرد هو بعينه ما سميناه « متوالية » ، وهو يشرع فى استنتاج الخواص المتعددة للمتواليات ، وبوجه خاص بالاستنباط الرياضى (٨٠) مما ينشأ عن الصورة المعممة المذكورة . فالعدد م يقال إنه أصغر من عدد آخر ن ، إذا كانت سلسلة ن داخلة فى صورة سلسلة م (٨٩) ، وكما يتبين فى الفقرتين (٨٨ ، ٩٠) أنه إذا وجد عددان مختلفان فأحدهما يجب أن يكون أصغر من الآخر . ومن هذه النقطة يسير كل شىء ببساطة .

٢٤٠ — أهم النقط الباقية التى تبدو ذات أهمية بالنسبة لغرضنا هى تعريف الأعداد الأصلية . فهو يبين (١٣٢) أن جميع الأنظمة اللانهائية المفردة تتشابه فيما بينها وتشبه الترتيبيات ، وبالعكس (١٣٣) أى نظام شبيه بنظام لا نهائى مفرد فهو لا نهائى مفرد . وإذا كان النظام متناهياً ، فهو شبيه بنظام نرمز له بقولنا ى ن ، حيث ى ن تعنى جميع الأعداد من ١ إلى ن بما فيها ١ ، ن . والعكس بالعكس (١٦٠) . ولا يوجد إلا عدد واحد ن له هذه الخاصية بالنسبة لأى نظام متناه معلوم ، فإذا اعتبرناه فى علاقته بهذه الخاصية يسمى « عدداً أصلياً » cardinal number ، ويقال إنه عدد العناصر التى يتألف منها النظام المذكور (١٦١) . وأخيراً نصل إلى الأعداد الأصلية . واعتمادها على الترتيبية بحسب تفسيرى لرأى ديديكند هو كالآتى : بسبب ترتيب الترتيبيات فكل عدد ترتيبى ن يعرّف فصلا من الترتيبيات ى ن ويشتمل على كل ما لا يتلوه . ويمكن تعريفها بأنها جميع ما لا تشتمل عليه صورة سلسلة ن . هذا الفصل من الأعداد الترتيبية قد يكون شبيهاً بفصل آخر يقال عنه حينئذ إن له العدد الأصلى ن . وإنما كان كل واحد منها يعرّف فصلا بسبب ترتيب الأعداد الترتيبية ، ولهذا كان هذا الترتيب مفروضاً من قبل فى الحصول على الأصليات .

٢٤١ — ولست بحاجة إلى التنويه بمزايا الاستنباط السالف الذكر فهى مزايا معترف بها من الجميع . غير أن ثمة بعض النقاط تحتاج إلى مناقشة . فمن جهة يبرهن ديديكند على الاستنباط الرياضى ، على حين يعتبره بيانو بديهية ، مما يجعل لديديكند

امتيازاً ظاهرياً يحتاج منا إلى فحص . ومن جهة أخرى ليس ثمة ما يدعو إلى القول بأن الأعداد ترتيبية لمجرد أن الأعداد التى يحصل ديديكند عليها « لها » ترتيب . ومن جهة ثالثة تعريفه للأصليات معقد بما لا ضرورة له ، كما أن اعتماد الأصليات على الترتيب إنما هو اعتماد ظاهرى . وسأتكلم عن كل نقطة من هذه النقط على التوالى .

أما فيما يختص ببرهان الاستنباط الرياضى فينبغى ملاحظة أن هذا البرهان يكافئ الغرض العملى من أن الأعداد تكون سلسلة تبدأ من واحد منها . ويمكن استنباط أى واحدة من الأخرى . أما القول بأن أيهما بديهية وأيهما نظرية فاختيار ذلك موكول إلى الذوق الشخصى . على الجملة ولو أن البحث فى السلاسل يحتاج إلى كثير من البراعة فهو أمر صعب بعض الشىء ، ومن مساوئه أن النظريات المتعلقة بالفصل المتناهى من الأعداد التى ليست أكبر من ن هى كقاعدة يجب أن تستنبط من نظريات مناظرة متعلقة بالفصل اللامتناهى من الأعداد التى هى أكبر من ن . ولهذه الأسباب لا بسبب أى امتياز منطقى يبدو من الأسهل البدء بالاستنباط الرياضى . هذا وينبغى ملاحظة أنه فى طريقة بيانو إنما نحتاج إلى الاستنباط الرياضى حين نريد البرهنة على نظريات تتعلق بأى عدد . ثم إن الحساب الابتدائى الذى كنا نتعلمه فى طفولتنا ، والذى إنما يبحث فى الأعداد الخاصة ، مستقل تماماً عن الاستنباط الرياضى ، ولو أننا حين نريد إثبات صحة ذلك بالنسبة لكل عدد خاص لاحتجنا إلى الاستنباط الرياضى . ومن جهة أخرى القضايا المتعلقة بالأعداد الخاصة فى طريقة ديديكند تحتاج كالقضايا العامة إلى بحث السلاسل . وبذلك نجد فى طريقة بيانو مزية متميزة من البساطة ، وفصلا أوضح بين قضايا الحساب العامة والخاصة . ولكن من وجهة النظر المنطقية البحتة يبدو أن الطريقتين صحيحتان على السواء . هذا وعلينا أن نتذكر أن كلا من بديهيات بيانو وديديكند تصبح فى ضوء النظرية المنطقية للأعداد الأصلية قابلة للبرهنة[1] .

٢٤٢ — أما عن النقطة الثانية فهناك نقص فى وضوح ما يقوله ديديكند . وإليك نص كلامه (٧٣) : « إذا كنا عند تأمل نظام لا نهائى مفرد ن يقوم

---

(١) انظر الباب الثالث عشر .

ترتيبه على تمثيل ϕ ، نطرح تماماً الطبيعة الخاصة للعناصر مع استبقاء إمكان تمييزها فقط ، ولا نبحث إلا فى العلاقات التى بها توضع بترتيب تمثيل ϕ ، حينئذ تسمى هذه العناصر « أعداداً طبيعية » أو « أعداداً ترتيبية » ، أو « أعداداً فقط » .

ومن المستحيل أن يكون هذا القول صحيحاً تماماً ، إذ أنه يستلزم أن حدود جميع المتواليات ما عدا الترتيبيات مركبة ، وأن الترتيبيات عناصر فى جميع مثل هذه الحدود نحصل عليها بالتجريد . ومن الواضح أن الأمر ليس على هذا النحو ، إذ يمكن تكوين متوالية من نقط أو لحظات أو من أعداد ترتيبية لا نهائية ، أو من أعداد أصلية ليست الترتيبيات عناصرها ، كما سنرى عما قريب . وعلاوة على ذلك من المستحيل ألا تكون الترتيبيات ، كما يذهب إلى ذلك ديديكند ، سوى حدود العلاقات التى تكوّن متوالية . وإذا وجب أن تكون الترتيبيات شيئاً مّا على الإطلاق فلابد أن تكون فى ذاتها شىء مّا . ولابد أن تفترق عن غيرها من الأمور كما تفترق النقط عن اللحظات ، أو الألوان عن الأصوات . ولعل ما كان ديديكند يقصده بالبيان هو التعريف بمبدإ التجريد ، مما حاولنا إعطاؤه فى الباب السابق . ولكن التعريف المصاغ على هذا النحو يدل دائماً على فصل من الأشياء لها (أو هى) طبيعة حقيقية بذاتها ، ولا تعتمد منطقياً على الطريقة التى عرفت بها . فالأشياء المعرَّفة يجب أن تكون مرئية على الأقل لعين العقل . أما ما يقرره المبدأ فهو أنه فى ظل ظروف معينة توجد مثل تلك الأشياء بشرط أن نعرف كيف نبحث عنها . حتى إذا وجدناها أتكون ترتيبية أو أصلية أو شيئاً مختلفاً تمام الاختلاف فأمر لا يمكن تقريره ابتداء . مهما يكن من شىء لا يوضح لنا ديديكند ما الذى تشترك فيه جميع المتواليات ، ولا يقدم أى سبب لافتراض أن هذا الشىء المشترك هو الأعداد الترتيبية ، فيما عدا أن جميع المتواليات تخضع لنفس القوانين التى تخضع الترتيبيات لها مما يثبت على حد سواء أن أى متوالية معلومة هى ما تشترك فيه جميع المتواليات .

٢٤٣ – وبهذا ننتقل إلى النقطة الثالثة ، وهى تعريف الأعداد الأصلية بواسطة الترتيبية . يلاحظ ديديكند فى مقدمته أن كثيراً من الناس لن يتعرفوا على الأعداد الطبيعية المألوفة لديهم من زمن طويل فى ظل الأشكال المبهمة التى يقدمها

إليهم . ويبدو لى فى هذا المضمار أن هؤلاء الناس ، وأنا معهم ، على حق . فالذى يقدمه ديديكند لنا ليس الأعداد بل أى متوالية : فما يقوله يصدق على جميع المتواليات على حد سواء ، ولا تتطلب براهينه – حتى حين يبحث فى الأعداد الأصلية – أى خاصية تميز الأعداد عن غيرها من المتواليات . ولم ينصب أى دليل يبين أن الأعداد أسبق من غيرها من المتواليات . حقاً إنه يخبرنا أنها ما تشترك فيه جميع المتواليات ، ولكن ليس ثمة أى سبب للظن أن للمتواليات أى شىء مشترك أكثر من الخواص المعينة فى التعريف ، وهذه لاتكون بذاتها متوالية جديدة . الواقع كل شىء يعتمد على علاقات الواحد بالواحد التى ظل ديديكند يستخدمها دون أن يلحظ أنها وحدها كافية فى تعريف الأصليات . ذلك أن علاقة التشابه بين الفصول وهى العلاقة التى يستخدمها عن وعى ، بالإضافة إلى مبدإ التجريد الذى يفترضه ضمناً كافيان فى تعريف الأصليات ، ولكنهما لا يكفيان فى تعريف الترتيبيات ، إذ نحتاج كما رأينا فى الباب السابق إلى علاقة الشبه likeness بين العلاقات المتسلسلة المحكمة الترتيب . وتعريف الأعداد الترتيبية المتناهية الخاصة يتم صراحة فى صيغة من الأعداد الأصلية المناظرة : إذا كان ن عدداً أصلياً متناهياً ، كان العدد الترتيبى ن فصل العلاقات المتسلسلة التى ن من الحدود فى ميدانها (أو فى مجالها إذا آثرنا هذا التعريف) . ولكى نعرف مفهوم النونية نحتاج بجانب العدد الترتيبى ن إلى مفهوم قوى العلاقة ، أى حاصل الضرب النسبى لعلاقة مضروبة فى نفسها عدداً متناهياً من المرات . فإذا كانت ع أى علاقة واحد بواحد متسلسلة ، وتولد متسلسلة متناهية أو متوالية ، فأول حد فى مجال ع (وهو المجل الذى سنسميه ء) هو الحد الذى ينتمى إلى الميدان لا إلى عكس الميدان ، أى له العلاقة ع لا العلاقة عَ . فإذا كان ء له ﻫ من الحدود أو أكثر من ﻫ ، حيث ﻫ عدد متناه ، فالحد النونى لـ ء هو الحد الذى له مع الحد الأول العلاقة عﻫ–١ ، أو الحد الذى له العلاقة عﻫ–١ ولكن ليس العلاقة عَﻫ–١ . ولامفر لنا من إدخال الأعداد الأصلية عن طريق فكرة قوى العلاقة . ولما كانت القوى تعرف بالاستنباط الرياضى فإن فكرة النونية تبعاً للتعريف السابق لا يمكن أن تمتد إلى ما وراء الأعداد المتناهية . ومع ذلك يمكن أن نبسط الفكرة بالتعريف الآتى : إذا كانت وﻫ علاقة متعدية غريبة aliorelative تولد متسلسلة محكمة الترتيب ﻫ ، فالحد النونى

ا و‍ہ هو الحد س‍ہ الذى يكون بحيث إذا كان و‍ہَ هو العلاقة و‍ہ محدودة ﺑ س‍ہ وسابقاتها ، كان ا و‍ہَ العدد الترتيبي ﻧ‍ہ . فنحن نجد هنا أن اعتماد الأصليات جاء من أن العدد الترتيبي ﻧ‍ہ لا يمكن بوجه عام أن يعرف إلا بواسطة العدد الأصلى ﻧ‍ہ .

ومن المهم ملاحظة أنه ليس لأى منظومة من الحدود بالطبع ترتيب معين أولى من ترتيب آخر ، وأنه لا حد هو الحد النونى لمنظومة إلا إذا كان متعلقاً بعلاقة مولدة خاصة مجالها هو المنظومة أو جزء منها . مثال ذلك أنه ما دام فى أى متوالية يمكن حذف أى عدد متناه من الحدود المتعاقبة بما فيها الحد الأول مع استمرار ما يبقى مكوناً متوالية ، أمكن إنقاص العدد الترتيبي للحد فى المتوالية لأى عدد أصغر نشاء . وبذلك يكون العدد الترتيبي لحد مَّا نسبياً مع المتسلسلة الذى ينتمى إليها . ويمكن أن يرد هذا إلى علاقة مع الحد الأول من المتسلسلة . ولئلا يظن أننا ندخل فى دور ، فيمكن تفسير ذلك بأن الحد « الأول » يمكن أن يعرف دائماً بطريقة غير عددية . وهو فى نظام ديديكند اللانهائى المفرد الحد الوحيد الذى لا تشتمل عليه الصورة فى النظام . وبوجه عام فى أى متسلسلة هو الحد الوحيد الذى له علاقة مكونة ذات جهة واحدة دون الجهة الأخرى[1]. وهكذا فإن العلاقة التى نعبر عنها بالنونية ليست فقط علاقة مع ﻥ ، بل أيضاً علاقة مع الحد الأول من المتسلسلة . و « الأول » ذاته يتوقف على الحدود الداخلة فى المتسلسلة ، وعلى العلاقة التى بها تترتب بحيث أن ما كان الأول قد يبطل أن يكون كذلك ، وما لم يكن الأول قد يصبح كذلك . وهكذا لابد من تعيين الحد الأول فى المتسلسلة ، كما هو حاصل فى رأى ديديكند عن المتوالية أنها سلسلة حدها الأول . ومن ثم كانت العلاقة النونية تدل على علاقة رباعية : بين الحد الذى هو العلاقة النونية . والحد المعين (الأول) ، وعلاقة مولدة متسلسلة ، والعدد الأصلى ﻥ . وبذلك يتضح أن الترتيبيات كانت فصولا من قبيل العلاقات المتسلسلة المشابهة ، أو أفكاراً كالعلاقات النونية ، فهى أعقد من الأصليات . كما يتضح أن النظرية المنطقية عن الأصليات مستقلة تماماً عن النظرية العامة عن المتواليات من حيث إنها تحتاج إلى تطور مستقل ليبين كيف

---

(١) ولو أنه حين يكون للمتسلسلة طرفان فعلينا أن نختار تحكمياً ما نسميه بالأول وما نسميه بالأخير . وطبيعة الأخير الظاهر أنها غير عددية وتوضح طبيعة المترابطة معها وهو الأول .

تكون الأصليات متوالية . وأن الترتيبيات عند ديديكند ليست بالرورة إما ترتيبيات أو أصليات ، بل أعضاء فى أى متوالية كانت . وقد أطنبت فى بحث هذه النقطة لأهميتها ، ورأيي يختلف عن رأى معظم فضلاء الباحثين . ولو كان رأى ديديكند صواباً لكان من الخطأ المنطقى أن نبدأ كما هو الحال فى هذا الكتاب بنظرية الأعداد الأصلية بدلا من الترتيب . والرأى عندى أن البدء بالترتيب ليس خطأ مطلقاً ، ما دامت خواص المتواليات ، بل معظم خواص المتسلسلات على العموم ، يظهر أنها مستقلة إلى حد كبير عن العدد . ولكن خواص العدد يجب أن تقبل البرهنة دون رجوع إلى الخواص العامة للمتواليات ما دامت الأعداد الأصلية يمكن أن تعرف تعريفاً مستقلا ؛ ويجب أن نبين أنها تكوّن متوالية قبل تطبيق النظريات الخاصة بالمتواليات عليها . ومن هنا كان السؤال عن الترتيب أو الأعداد بأيهما نبدأ أولا يرجع إلى المناسبة والبساطة . ومن هذه الوجهة من النظر يبدو من الطبيعى أن الأعداد الأصلية تسبق فى بحثها المباحث الشديدة الوعورة الخاصة بالمتسلسلات والتى شغلتنا خلال هذا الجزء .

الباب الواحد والثلاثون

المسافة

٢٤٤ ـ فكرة المسافة من الأفكار المفروض فى الغالب أنها جوهرية فى المتسلسلات[١] ولكنها يصعب أن تقبل تعريفاً مضبوطاً . وتأكيد القول فى المسافة يميز بوجه عام أولئك الذين يعتقدون فى الوضع النسبي . فهذا ليبنتز يلاحظ وهو يناقش كلارك Clarke أن :

« فإن قيل : إن المكان والزمان كميتان . أو الأولى أنهما شيئان يمتازان بالكمية ، وليس الأمر كذلك فى الوضع والترتيب .

قلتُ : للترتيب كذلك كميته ، ففيه ما يأتى قبل ، وما يأتى بعد . فهناك مسافة أو فترة . وللأشياء النسبية كميتها كما للأشياء المطلقة . مثال ذلك أن النسبة والتناسب فى الرياضة لهما كميتهما ، واللوغارتيمات تقيسهما ، ومع ذلك فهما علاقات . ويترتب على ذلك أن الزمان والمكان ولو أنهما يقومان على علاقات إلا أن لهما كميتهما[١] »

فى الفقرة السابقة عبارة : « ففيه ما يأتى قبل ، وما يأتى بعد . فهناك مسافة أو فترة » إذا أخذت على أنها قياس لم تنتج ، لأن مجرد الترتيب لا يدل على وجود مسافة أو فترة . بل يدل كما رأينا على وجود امتدادات stretches ، وأن هذه الامتدادات قادرة على صورة خاصة من الجمع شديدة الشبه بما سميته الجمع العلاقى relational addition ، وأن لها علامة ، وأن الامتدادات (على الأقل نظرياً) التى تحقق بديهيات أرشميدس والبديهية الخطية linearity قابلة دائماً للقياس العددى . ولكن الفكرة كما نبه مينونج بحق متميزة تماماً عن فكرة الامتداد . فسواء اشتملت أى متسلسلة خاصة على مسافات أو لم تشتمل ، فهى مسألة فى معظم المتسلسلات الملتحمة compact (وهى التى يكون فيها حد بين أى حدين)

---

(١) انظر مثلا كتاب الأستاذ مينونج ، الفقرة ١٧ .

Phil. Werke, Gerhardt's ed. Vol. VII, p. 404.

لا تتقرر بالحجة . وفى المتسلسلات المنفصلة لابد من وجود مسافة ، وفى غيرها قد توجد المسافة – إلا إذا كانت متسلسلات نحصل عليها من متواليات كما نحصل على المنطقات أو الأعداد الحقيقية من الأعداد الصحيحة . وفى هذه الحالة لابد من وجود مسافة . غير أننا سنجد أن الامتدادات كافية رياضياً ، وأن المسافات معقدة وغير مهمة .

٢٤٥ – ولنبدأ بقولنا إن تعريف المسافة ليس أمراً هيناً، وكل ما عمل حتى الآن لتحقيق هذا الغرض يرجع الفضل فيه بوجه خاص إلى الهندسة غير الأقليدية[١] .

وكذلك سعى مينونج إلى وضع تعريف للمسافة . ولكن فى كلتا الحالتين نجد العناية بالقياس العددى للمسافة أكثر من تعريفها الفعلى . ومع ذلك ليست المسافة بأى حال غير قابلة للتعريف . ولنحاول تعميم فكرتها ما أمكننا إلى ذلك سبيلا . أول كل شىء ليس من الضرورى أن تكون المسافة لا متماثلة ، ولكن خواص المسافة الأخرى تسمح لنا دائماً أن نجعلها كذلك . ولهذا يمكن أن نأخذها على أنها لا متماثلة . وثانياً ليس من الضرورى أن تكون المسافة كمية أو مقداراً ، ومع أنها تؤخذ عادة على أنها كذلك . إلا أننا سنرى أن هذا الأخذ بعيد عن خواصها الأخرى،وبوجه خاص مع قياسها العددى . وثالثاً حين تؤخذ المسافة لا متماثلة فلابد من وجود حد واحد فقط له مع حد معلوم مسافة معلومة . ولابد أن تكون عكس العلاقة مع المسافة المعلومة مسافة من نفس النوع . (نلاحظ أنه يجب أولا تعريف « نوع » المسافة . ثم نشرع من ذلك إلى التعريف العام للمسافة) وهكذا فإن كل مسافة فهى علاقة واحد بواحد ، وبالنسبة لمثل هذه العلاقات يكون من المناسب أن نأخذ فى الاعتبار عكس العلاقة على أنها قوتها الأولى . وبعد ذلك فحاصل الضرب النسبى لمسافتين من نوع واحد يجب أن يكون مسافة من نفس النوع . وإذا كانت المسافتان متعاكستين بالتبادل كان حاصل ضربهما تطابقاً ، وهو بذلك واحد فى المسافات (الواقع أنه صفر) ، ويجب أن يكون الشى الوحيد الذى ليس لا متماثلا . ثم إن حاصل ضرب مسافتين من نوع

---

(١) انظر مثلا Whitehead, *Universal Algebra*, Cambridge 1898, Book VI, Chap I.

(٢) المرجع السابق القسم الرابع .

واحد يجب أن يكون تبادلياً commutative[١] . فإذا كانت المسافات من نوع واحد مقادير ، فيجب أن تكوّن نوعاً من المقدار – مثلا أى مسافتين يجب أن تكونا متساويتين أو غير متساويتين . فإذا لم تكن مقادير ، فيجب مع ذلك أن تكون متسلسلة متولدة بالطريق الثانى من الطرق الست . نعنى كل زوج من مسافتين مختلفتين لابد أن يكون له علاقة لا متماثلة معينة . وهى نفس العلاقة لجميع الأزواج إلا فيما يختص بالجهة . وأخيراً إذا كانت ك هى هذه العلاقة ، وكانت $ع_1$ ك $ع_2$ (حيث $ع_1$ ، $ع_2$ مسافتان من نوع واحد) وإذا كانت $ع_3$ أى مسافة من نفس النوع فلابد أن نحصل على $ع_1$ $ع_3$ ك $ع_2$ $ع_3$. وجميع هذه الخواص بمقدار ما أتبين مستقلة . وعلينا أن نضيف خاصية للمجال هى هذه : أى حدين ينتمى كل منهما لمجال مسافة من نوع (ليس من الضرورى أن يكون النوع واحداً لكليهما) فلهما علاقة هى مسافة من هذا النوع . وإذ قد عرفنا الآن نوع المسافة ، فالمسافة هى أى علاقة تنتمى لنوع معين من المسافة . وبذلك يظهر أن التعريف قد بلغ التمام .

أما فكرة المسافة فهى كما سنرى معقدة أشد التعقيد . وخواص المسافات شبيهة بخواص الامتدادات ذات العلامة ، ولكنها أقل قدرة على الاستنتاج المتبادل . أما خواص الامتدادات المناظرة لكثير من خواص المسافات المذكورة آنفاً فهى قابلة للبرهنة . والفرق بينهما يرجع بوجه عام إلى أن الامتدادات يمكن أن تجمع بالطريقة المنطقية الابتدائية (لا الحسابية) على حين تحتاج المسافات إلى ما سميته بالجمع «العلاقى» relational وهو شبيه جداً بالضرب النسبى .

٢٤٦ – سبق أن شرحنا فى الجزء الثالث شرحاً جزئياً القياس العددى للمسافات ، ورأينا أنه يحتاج فى تطبيقه الكامل إلى مسلمتين أخريين لا يتعلقان بتعريف المسافات بل ببعض أنواع المسافات فقط . والمسلمتان هما : مسلمة أرشميدس القائلة بأنه إذا علمت مسافتان من نوع واحد ، فهناك عدد صحيح ن بحيث تكون القوة النونية للمسافة الأولى أكبر من المسافة الثانية . ومسلمة ديبوا ريموند Du Bois Reymond عن الخطية وهى هذه : كل مسافة فلها جذر

---

(١) وهذه خاصية مستقلة . ولتعتبر مثلا الفرق بين الجد من جهة الأم ، والجد من جهة الأب .

نونى ، حيث ن أى عدد صحيح (أو أى عدد أولى ويترتب على ذلك أى عدد صحيح) . فإذا تحققت هاتان المسلمتان أمكن أن نجد ا ع س ع معنى ، حيث ع مسافة من نفس النوع خلاف التطابق ، وحيث س أى عدد حقيقى [١]. وفضلا عن ذلك أى مسافة من نفس النوع هى من الصورة ع^س ، بفرض قيمة معينة ا س . أما س فهى بالطبع القياس العددى للمسافة .

وفى حالة المتسلسلات المتولدة بالطريقة الأولى من الطرق الست ، فإن القوى المتعددة للعلاقة ع المولدة تعطى مسافات الحدود . هذه القوى المتعددة — كما يمكن أن يتبين القارئ من تلقاء نفسه — تحقق جميع خواص المسافات المذكورة . وفى حالة المتسلسلات المتولدة عن متواليات ، كالمنطقات أو الأعداد الحقيقية من الأعداد الصحيحة ، فهناك دائماً مسافات . وهكذا فإنه فى حالة المنطقات ذاتها التى هى علاقات واحد بواحد ، فإن الفروق بينها وهى أيضاً منطقات تقيس أو تدل على علاقات بينها ، هذه العلاقات هى من طبيعة المسافات . وسنرى فى الجزء الخامس أن لهذه العلاقات بعض الأهمية فيما يتصل بالنهايات . ذلك أن القياس العددى فى بعض صوره أساسى فى نظريات معينة عن النهايات ، والقياس العددى للمسافات أدنى إلى الإجراء العملى من الامتدادات .

٢٤٧ — فيما يختص بهذا السؤال العام : أتكون المتسلسلات غير المرتبطة بالعدد — مثل المتسلسلات المكانية والزمانية — بحيث تشتمل على مسافات ، فمن الصعب إبداء الرأى بالإيجاب . فهناك أمور يمكن أن تذكر ضد هذه الوجهة من النظر . فأولا لابد من وجود امتدادات ، ويجب أن تكون هذه الامتدادات مقادير . وعندئذ ينشأ مجرد فرض — ويجب أن نضعه كبديهية — وهو أن الامتدادات المتساوية تناظر مسافات متساوية . بالطبع يمكن إنكار هذا الفرض ، ويمكن أن نبحث عن تأويل من الهندسة غير الإقليدية فى هذا الإنكار . وقد ننظر إلى

(١) قوى المسافات مأخوذة هنا بالمعنى الناشىء من حاصل الضرب النسبى . وهكذا إذا كان ا ، ب لهما نفس المسافة مثل ب ، ج ، فهذه المسافة هى الجزء التربيعى للمسافة بين ا ، ج . ومسلمة الخطية التى يمكن التعبير عنها فى لغة عادية بقولنا : « كل كمية خطية يمكن أن تنقسم إلى ن من الأجزاء المتساوية ، حيث ن عدد صحيح » موجودة فى كتاب

Du Bois Reymond, *Allgemeive Functionenthcosie* (Tubingen, 1882) p. 46.

الإحداثيات العادية على أنها تعبر عن امتدادات ، وإلى لوغاريتمات نسبها غير التوافقية anharmonic على أنها تعبر عن مسافات. وبذلك يمكن أن تجد الهندسة الزائدية hyperbolic على الأقل تأويلا غريباً بعض الشئ — ويذهب الأستاذ مينونج وهو الذى يعد جميع المتسلسلات مشتملة على مسافات إلى مبدإ شبيه بذلك فيما يختص بالمسافة والامتداد بوجه عام . فهو يرى أن المسافة إنما تزداد بازدياد لوغاريتم الامتداد . ويمكن ملاحظة أنه حيث تكون المسافة ذاتها عدداً منطقاً (وهذا ممكن ما دامت المنطقات علاقات واحد بواحد) أمكن أن تجعل النظرية المقابلة مقبولة صورياً بالحقيقة الآتية . يقال إن مربع مسافة مّا ، كما رأينا بوجه عام ، هو ضعف هذه المسافة التى هى مربعها . ويمكن أن نقول بدلا من ذلك حيث تكون المسافة عدداً منطقاً أن الامتداد هو الضعف ، ولكن المسافة هى حقاً مربع المسافة الأولى . ذلك أنه حيث تكون المسافة عددية يتعارض التأويل العادى للقياس العددى مع الترقيم ع[٢] ، وبذلك نضطر إلى اعتبار الامتداد متناسباً مع لوغاريتم المسافة . ولكن ما دمنا بصرف النظر عن نظرية المتواليات نشك عادة فى وجود مسافات ، وما دامت الامتدادات فى جميع المتسلسلات الأخرى تقريباً يظهر أنها محققة لجميع النتائج التى نريد الحصول عليها ، فإن استبقاء المسافة يضيف تعقيداً لسنا كقاعدة فى حاجة إليه . من الأفضل إذن بوجه عام على الأقل فى فلسفة الرياضيات استبعاد المسافات فيما عدا نظرية المتواليات ، وأن نقيسها فى ظل تلك النظرية بدلالات قوى العلاقات المولدة . وليس ثمة سبب منطقى فيما أعرف لافتراض وجود مسافات فى أى مكان ، فيما عدا المكان المتناهى ذى البعدين ، وفى الفراغ الإسقاطى . وحتى بفرض وجودها فإنها ليست ذات أهمية رياضية . وسنرى فى الجزء السادس كيف يمكن أن تنشأ نظرية المكان والزمان دون افتراض المسافة . أما المسافات التى تظهر فى الهندسة الإسقاطية فهى علاقات مشتقة لا نحتاج إليها فى تعريف خواص مكاننا . وسنرى فى الجزء الخامس أن وظائف المسافة قليلة جداً بالنسبة للمتسلسلات بوجه عام .

ومما يعترض به على المسافة أيضاً أنه إذا وجب أن تشتمل كل متسلسلة على مسافات ، فلا مفر من التراجع إلى ما لا نهاية له ، ما دام كل نوع من المسافة هو نفسه متسلسلة . ولست أرى أن هذا اعتراض منطقى ، ما دام التراجع يعد من النوع

المسموح به منطقياً ، ولكن الاعتراض يبين كيف تنشأ تعقيدات كبيرة من اعتبار المسافات ضرورية فى كل متسلسلة . جملة القول يبدو أن وجود المسافات بوجه عام أمر مشكوك فيه ، فإن وجدت كان وجودها غير ذى بال فيما يظهر . ومصدر تعقيدات شديدة .

٢٤٨ ـ أكملنا الآن عرض الترتيب بمقدار الطاقة دون إدخال الصعوبات الخاصة بالاتصال واللانهاية ، فرأينا أن كل ترتيب يتطلب علاقات متعدية لا متماثلة ، وأن أى متسلسلة من حيث هى كذلك فهى مفتوحة . ولكننا رأينا أن المتسلسلات المقفلة يمكن أن تتميز بطريقة تولدها ، وبأنها مع أن لها دائماً حداً أول فهذا الحد الأول يمكن دائماً اختياره بطريقة تحكمية . ورأينا أن العلاقات اللامتماثلة يجب ألا تقبل التحليل فى بعض الأحيان ، فإذا قبلت التحليل فلابد أن تظهر علاقات لا متماثلة أخرى فى التحليل . ووجدنا أن اختلاف العلامة يتوقف دائماً على الفرق بين العلاقة اللامتماثلة وعكسها . ورأينا عند مناقشة الصنف الخاص من المتسلسلات الذى سميناه متواليات كيف أن جميع الحساب ينطبق على متسلسلة من هذه المتسلسلات ، وكيف يمكن بواسطتها تعريف الترتيبيات المتناهية . ولكن مع أننا وجدنا أن هذه النظرية مستقلة إلى حد ما عن الأصليات ، إلا أننا لم نر أى سبب لموافقة ديديكند فى اعتباره الأصليات تابعة منطقياً للترتيبيات . وأخيراً اتفقنا على أن المسافة فكرة ليست جوهرية فى المتسلسلات ، وقليلة الأهمية خارج الحساب . وبهذا الزاد أرجو أن أكون قادراً على حل جميع الصعوبات التى وقف عندها الفلاسفة عادة عند النظر فى الاتصال واللانهاية. فإذا استطعت أن أقوم بهذه المهمة فقد تحل إحدى المشكلات الفلسفية العويصة . وسنقصر الجزء الخامس على بحث هذه المشكلة .

الجزء الخامس

اللانهاية والاتصال



الباب الثانى والثلاثون

ترابط المتسلسلات

٢٤٩ ـ نشرع الآن فى بحث ما يعتبر بوجه عام المشكلة الأساسية فى فلسفة الرياضيات ـ أعنى مشكلة اللانهاية والاتصال . وقد تحولت هذه المشكلة على يدى فايرشتراس وكانتور تحولا كاملا . فمنذ نيوتن وليبيتز كانت طبيعة اللانهاية والاتصال تلتمس فى المناقشات التى تعرف باسم الحساب التحليلى للكميات اللامتناهية فى الصغر Infinitesimal calculus . وقد تبين أن هذا الحساب ليس فى الواقع على صلة بأى شكل باللانهائى الصغر ، وأن فرعاً كبيراً عظيم الأهمية من الرياضيات متقدم منطقياً عليه . وعلاوة على ذلك فإن مشكلة الاتصال قد فصلت إلى حد كبير عن مشكلة اللانهاية . وكان المعتقد فيما سبق ـ وهنا تقوم القوة الحقيقية فى فلسفة كانط الرياضية ـ أن للاتصال تعلقاً جوهرياً بالمكان والزمان ، وأن الحساب التحليلى calculus (كما توحى بذلك لفظة fluxion) يفترض من بعض الوجوه الحركة ، أو على الأقل التغير . وطبقاً لهذه الوجهة فى النظر فلسفة المكان والزمان أسبق من الاتصال ، فالاستطيقا الترنسندنتالية[٢] تسبق الديالكتيك الترنسندنتالى ، والنقائض (على الأقل الرياضية منها) هى أساساً زمكانية spatio - temporal . وكل ذلك قد غيرته الرياضيات الحديثة . وما يسمى بتحسيب الرياضيات arithmetization قد بيَّن أن جميع المشكلات العارضة فى هذا الصدد عن المكان والزمان موجودة من قبل فى الحساب البحت . ولنظرية اللانهاية صورتان : أصلية وترتيبية ، فالأصلية تنشأ من النظرية المنطقية للعدد ، أما نظرية الاتصال فترتيبية بحتة . والمشاكل التى تنشأ فى نظرية الاتصال والنظرية الترتيبية عن اللانهاية ليست متصلة بالعدد بوجه خاص ، بل بجميع المتسلسلات من صنف معين والتى

---

(١) لفظة ترنسندنتال اصطلاح فى فلسفة كانط ، transcendental ويقصد به ما كان أولياً سابقاً على التجربة . (المترجم)

تحصل فى الحساب والهندسة على حد سواء . وما يجعل المشاكل المذكورة سهلة البحث بوجه خاص فى حالة الأعداد ، فهو أن متسلسلة المنطقات التى سأسميها بالمتسلسلة « الملتحمة » compact تنشأ من متوالية هى بالذات متوالية الأعداد الصحيحة ، وهذه الحقيقة هى التى تمكننا من تسمية « كل» حد من متسلسلة المنطقات – وهى نقطة تختلف فيها هذه المتسلسلة عن غيرها من الصنف عينه . ولكن النظريات من هذا النوع ، والتى سنشتغل ببحثها فى معظم الأبواب التالية ، مع أننا نحصل عليها فى الحساب إلا أن لها ميداناً أوسع فى التطبيق ، إذ كانت ترتيبية بحتة ولا تتطلب شيئاً من الخواص المنطقية للأعداد . بعبارة أخرى الفكرة التى يسميها الألمان Anzahl، وهى فكرة عدد الحدود فى فصل معين ، لا محل لها فيما عدا فقط نظرية الأصليات المتصاعدة transfinite وهذا جزء هام ولكنه متميز عن مساهمات كانتور فى نظرية اللانهاية . وسنجد أنه من الممكن إعطاء تعريف عام للاتصال لا نرجع فيه إلى جملة الأفكار المتميزة التى لم تحلل والتى يسميها الكانطيون « الحدس » intuition . وسنجد فى الجزء السادس أن أى اتصال آخر غير مطلوب فى المكان والزمان . كما سنجد مع التمسك الدقيق بمذهب النهايات أنه من الممكن الاستغناء تماماً عن اللانهائى الصغر حتى فى تعريف الاتصال وفى أسس الحساب التحليلى

٢٥٠ – من الحقائق الغريبة أنه بمقدار ما استبعد الحساب اللانهائى الصغر من الرياضيات ، فقد أتيح للانهائى فرصة أرحب للنمو . ويظهر من مباحث كانتور أن هناك اعتبارين بهما تختلف الأعداد اللامتناهية عن المتناهية . وأول الاعتبارين ينطبق على الأصليات والترتيبيات على حد سواء ، وهو أنهما لا يخضعان للاستنباط الرياضى – أو الأحرى أنهما لا يكونان جزءاً من متسلسلة تبدأ من ١ أو ٠ وتسير فى ترتيب المقدار ومشتملة على جميع الحدود المتوسطة فى المقدار بين أى حدين من حدودها ، ومتميشة مع الاستنباط الرياضى . والاعتبار الثانى الذى إنما ينطبق على الأصليات فقط ، فهو أن المجموع المكوّن من عدد لا نهائى من الحدود يشتمل دائماً على جزء يتكون من نفس عدد الحدود . والاعتبار الأول يكون التعريف الصحيح للمتسلسلة اللانهائية ، أو الأحرى ما يمكن أن نسميه الحدود اللانهائية فى متسلسلة : وهذا التعريف يعطى جوهر اللانهائى الترتيبى . والاعتبار

الثانى يعطى تعريف المجموعة اللانهائية . وسيقول بلاشك الفلاسفة عنه إنه واضح التناقض مع نفسه . ولكن هؤلاء الفلاسفة إذا تنازلوا وحاولوا البحث فى التناقض ، فسيجدون أنه إنما يبرهن عليه بتسليم الاستنباط الرياضى . وهم بذلك إنما يقيمون ارتباطاً مع اللانهائى الترتيبى . وعندئذ يضطرون إلى التسليم بأن إنكار الاستنباط الرياضى متناقض مع نفسه . فإن أنعموا النظر قليلا فى هذا الموضوع ، فقد يحسن بهم أن يبحثوا الأمر قبل الحكم عليه . فإذا سلمنا بأنه يمكن إنكار الاستنباط الرياضى بغير تناقض ، فستختفى بتاتاً نقائض اللانهاية والاتصال . وهذا ما سأحاول إثباته بالتفصيل فى الأبواب الآتية .

٢٥١ — ستتاح لنا الفرصة خلال هذا الجزء لبحث فكرة لم تكد تذكر حتى الآن ، وهى ترابط المتسلسلات . فقد بحثنا فى الجزء السابق طبيعة المتسلسلات المنفردة ، ولكننا لم نبحث العلاقات بين مختلف المتسلسلات . ومع ذلك فهذه العلاقات لها أهمية عظيمة لم يفطن لها الفلاسفة ، ولم يتنبه لها الرياضيون إلا أخيراً . لقد كان معروفاً من زمن طويل ماذا يمكن عمله فى الهندسة بواسطة التطابق homography ، مما يعد مثالا على الترابط correlation. وقد بين كانتور أهمية معرفة المتسلسلة المعدودة denumerable ، ومعرفة تشابه متسلسلتين لهما القدرة على الترابط . ولكن لم تجر العادة أن يبين كيف أن المتغير التابع ومتغيره المستقل هما فى معظم الأحوال الرياضية مجرد متسلسلتين مترابطتين ، ولا بحثت الفكرة العامة للترابط بحثاً كاملا . والذى يعنينا بحثه فى هذا الكتاب فهو الوجوه الفلسفية للموضوع فقط .

يقال إن متسلسلتين ل ، لَ مترابطتان حين توجد علاقة واحد بواحد ع تجمع بين كل حد من حدود ل مع كل كل حد من حدود لَ ، والعكس بالعكس ؛ وإذا كان س ، ص حدين فى ل ، وكان س سابقاً على ص ، فإن المترابطين معهما وهما سَ ، صَ فى لَ يكونان بحيث يسبق سَ صَ . ويقال إن فصلين أو مجموعتين مترابطان عندما توجد علاقة واحد بواحد بين حدود الأول وحدود الثانى بحيث لا يتخلف شىء . وهكذا نرى أن متسلسلتين يمكن أن يترابطا كفصلين دون أن يترابطا كمتسلسلتين ، لأن الترابط كفصلين إنما يتطلب نفس العدد الأصلى ، على حين أن الترابط كمتسلسلتين يتطلب أيضاً نفس الصنف الترتيبى — وهو تمييز

سنفسر أهميته فيما بعد . ولكي نميز بين هاتين الحالتين يحسن أن نتكلم عن ترابط الفصلين كمجرد ترابط ، وعن ترابط المتسلسلتين كترابط ترتيبي . فكلما ذكر الترابط بغير صفة ، فعلينا أن نفهم أنه ليس من الضروري أن يكون ترتيبياً . وسنسمي الفصلين المترابطين متشابهين similar ؛ وسنسمي المتسلسلتين المترابطتين متشابهتين ترتيبياً ordinally si r.ilar ؛ وعلاقاتهما المولدة سنقول إن لها علاقة الشبه likeness .

الترابط طريقة بها يمكن إذا أعطيت متسلسلة أن يتولد عنها متسلسلات أخرى . فإذا وجدت أي متسلسلة علاقتها المولدة ق . ووجدت علاقة واحد بواحد تقوم بين أي حد س من المتسلسلة وبين حد آخر نسميه سع ، فإن فصل الحدود سع يكوّن متسلسلة من نفس الصنف كفصل الحدود س . ولنفرض ص أي حد آخر من متسلسلتنا الأصلية . ولنفرض أن س ق ص . عندئذ نحصل على سع عَ س ، ص ق ص ، ص ع صع . والحاصل هو سع عَ ق ع صع . ويمكن أن نبين الآن[1] أنه إذا كان ق متعدياً لا متماثلا ، فكذلك عَ ق ع . ومن ثم فإن مترابطات متسلسلة ق تكون متسلسلة علاقتها الموالدة هي عَ ق ع . ويوجد بين هاتين المتسلسلتين ترابط ترتيبي . ويوجد بين المتسلسلتين تشابه ترتيبي كامل . وبهذه الطريقة تتولد متسلسلة جديدة شبيهة بالمتسلسلة الأصلية ، وذلك بعلاقة واحد بواحد يشمل مجالها المتسلسلة الأصلية . ويمكن أن نبين أيضاً أنه بالعكس إذا كان ق . قَ العلاقتين المولدتين في متسلسلتين متشابهتين ، فهناك علاقة واحد بواحد ع ميدانها هو مجال ق بحيث أن قَ = ع ق ع .

٢٥٢ – ونستطيع الآن أن نفهم تمييزاً على أهمية عظمى ، نعني التمييز بين متسلسلة مكتفية بذاتها أو مستقلة ، ومتسلسلة بالترابط . وفي الحالة التي شرحناها من قبل هناك تماثل رياضي تام بين المتسلسلة الأصلية والمتسلسلة بالترابط . لأننا إذا رمزنا بالرمز ك للعلاقة عَ ق ع ترتب على ذلك أن ق = ع ك عَ . وهكذا يمكن اتخاذ إما متسلسلة ك أو متسلسلة ق كالمتسلسلة الأصلية ، ونعتبر الأخرى مشتقة derivative منها . ولكن إذا حدث أن ع بدلا من أن تكون علاقة

---

(١) انظر مقالتي في مجلة RdM, Vol. VIII, No. 2

واحد بواحد كانت علاقة كثير بواحد ، فإن حدود مجال ك ، والتى سنسميها ك ، سيكون لها ترتيب فيه تكرار . أى أن نفس الحد يقع فى مواضع مختلفة مناظرة لمترابطاتها المختلفة فى مجال ف ، والذى سنسميه ف . وهذه الحالة العادية للدوال الرياضية التى ليست خطية . وبسبب انشغال معظم الرياضيين بمثل هذه المتسلسلات فإنهم يعجزون عن تبين استحالة تكرر نفس الحد فى المتسلسلة المستقلة . مثال ذلك أنه فى كل جملة مطبوعة تكتسب الحروف ترتيباً بالترابط مع نقط المكان ، ويتكرر نفس الحرف فى أوضاع مختلفة . والحال هنا أن متسلسلة الحروف مشتقة أساساً ، لأننا لا نستطيع أن نرتب نقط المكان بالعلاقة مع الحروف فهذا يعطى نقطاً متعددة فى نفس الوضع بدلا من حرف واحد فى أوضاع عدة . الواقع إذا كانت ف علاقة متسلسلة ، و ع علاقة كثير بواحد ميدانها هو مجال ف ، وكان ك = عَ ف ع ، فإن ك له جميع خواص العلاقة المتسلسلة ما عدا خاصية استلزام التعدد . ولكن ع ك عَ لا تكافئ ف ، وبذلك يوجد نقص فى التماثل . ولهذا السبب كانت عكس الدوال فى الرياضيات مثل جا⁻¹ س متميزة تميزاً حقيقياً من الدوال المباشرة ، وتحتاج إلى تدبير خاص أو أو اصطلاح قبل أن تصبح ولا إبهام فيها . والمتسلسلات التى نحصل عليها من ترابط كثير بواحد ، كما حصلنا على ف من قبل ، تسمى متسلسلات بالترابط ، وهى ليست متسلسلات أصلية ، ومن الأهمية بمكان استبعادها من المناقشات الأساسية

٢٥٣ ــ وفكرة الشبه likeness تُنَاظر بين العلاقات التشابُهَ بين الفصول ، وتُعَرَّف كما يأتى : تكون العلاقتان ف ، ك شبيهتين عندما توجد علاقة واحد بواحد ط بحيث أن ميدان ط هو مجال ف ، وتكون ك = طَ ف ط .

ولا تقتصر هذه الفكرة على العلاقات المتسلسلة بل يمكن تعميمها لتشمل جميع العلاقات . ويمكن تعريف عدد العلاقة relation-number لعلاقة ما ف بأنه فصل جميع العلاقات التى تشبه ف ، ومن هنا نستمر إلى موضوع عام جداً يمكن أن نسميه حساب العلاقة relation-arithmetic . أما فيما يختص بأعداد العلاقة فيمكن إثبات تلك العلاقات الخاصة بالقوانين الصورية للجمع والضرب والتى تنطبق على الترتيبيات المتصاعدة ، فنحصل بذلك على امتداد لجزء من الحساب الترتيبي يشمل

العلاقات بوجه عام . ويمكن بواسطة الشبه تعريف العلاقة المتناهية بأنها تلك التى لا تشبه أى جزء خاص من ذاتها[1] — حيث أن الجزء الخاص من العلاقة هو علاقة تستلزمها دون أن تكافئها . وبهذه الطريقة يمكن أن نتحرر تماماً من الحساب الخاص بالأعداد الأصلية . وفضلا عن ذلك فإن خواص المشابهة لها فى ذاتها فائدة وأهمية . ومن خواصها الغريبة أنه إذا كانت ط علاقة واحد بواحد ولها المجال ف ميدانها ، فالمعادلة المذكورة سابقاً ك = طَ ف ط تكافئ ط ك = ف ط أو ك طَ = طَ ف .

٢٥٤ — ما دام ترابط المتسلسلات أساس معظم الأمثلة الرياضية عن الدوال ، وكانت الدالة فكرة ليس شرحها واضحاً فى الغالب ، فقد يحسن بنا أن نذكر شيئاً عن طبيعة هذه الفكرة . فى صورتها الأعم جداً لا تختلف فكرة الدالية عن العلاقة . ويجدر فى هذه المناسبة أن نتذكر اصطلاحين فنيين عرفناهما فى الجزء الأول . إذا كان س له علاقة معينة مع ص ، فنسمى س « المتعلق به» referent ، ونسمى ص « المتعلق » relatum وذلك بالنسبة للعلاقة المذكورة . فإذا عرفنا س بأنه ينتمى لفصل مّا داخل فى ميدان العلاقة ، حينئذ تعرِّف العلاقة ص بأنها دالة دالة س . بعبارة أخرى يتكون متغير مستقل من مجموعة حدود كل حد منها يمكن أن يكون متعلقاً به بالنسبة لعلاقة معلومة . وعندئذ يكون لكل حد من هذه الحدود متعلق أو أكثر من متعلق ، وأى حد منها هو دالة معينة لما يتعلق به ، من حيث أن الدالة تعرف بالعلاقة . مثال ذلك أن « الأب » يعرف دالة بشرط أن يكون المتغير المستقل فصلا داخلا فى الحيوانات الذكور الذين ينشرون نوعهم أو سينشرونه . فإذا كان ا أب ب ، قيل إن ب دالة ا . المهم هو وجود متغير مستقل ، نعنى أى حد من فصل مّا ، ووجود علاقة تمتد فتشمل المتغير . وعندئذ يكون المتعلق به هو المتغير المستقل ، ودالته أى واحد من المتعلقات المناظرة .

ولكن هذه الفكرة العامة جداً عن الدالة قليلة الفائدة فى الرياضيات . وهناك طريقتان أساسيتان لتخصيص الدالة . الأولى أننا قد نخصص العلاقات بحيث

(١) انظر فى هذا الموضوع مقالتى فى مجلة R d M, Vol. VIII, Ns. 2 6.

تقتصر على واحد بواحد أو كثير بواحد ، أى بحيث تعطى لكل متعلق به متعلقاً وحيداً ؛ والثانية أن نقصر المتغير المستقل على المتسلسلات . والتخصيص الثانى فى غاية الأهمية ويدخل بوجه خاص فى موضوعنا الحاضر . ولكن حيث كان هذا التخصيص يكاد يستبعد الدوال تماماً من المنطق الرمزى ، إذ المتسلسلات فيه قليلة الأهمية ، فقد يحسن أن نؤجل البحث فى هذا الوجه الثانى قليلا ، ولننظر فى التخصيص الأول فقط .

فكرة الدالة بالغة الأهمية ، والغالب أن بحثها كان مقتصراً على علاقتها بالأعداد ، لذلك يحسن أن نسوق أمثلة كثيرة على دوال غير عددية . ومن فصول الدوال العظيمة الأهمية القضايا المشتملة على متغير [١] . ولتكن قضية ما تقع فيها هذه العبارة « أى ا » ، حيث ا فصل مَّا . ثم نضع بدلا من « أى ا » س ، حيث س عضو غير معرف فى الفصل ا — وبعبارة أخرى أى ا . وعندئذ تصبح القضية دالة س ، وتصبح القضية فريدة إذا أعطيت س وستكون القضية على العموم صادقة لبعض قيم س ، وكاذبة لبعضها الآخر . والقيم التى تصدق لها الدالة تكوِّن ما قد نسميه بالمنحنى المنطقى ، تشبيهاً بالهندسة التحليلية . وهذه النظرة العامة يمكن فى الواقع أن نجعلها تشمل الهندسة التحليلية . مثال ذلك أن معادلة المنحنى المستوى هى دالة قضية عبارة عن دالة ذات متغيرين س ، ص ، والمنحنى هو مجموع النقط التى تعطى المتغيرين قيماً تجعل القضية صادقة . والقضية التى تشتمل على لفظة « أى » هى حكم بأن دالة قضية معينة صادقة لجميع قيم المتغير الذى تنطبق عليه . فقولنا : « أى إنسان فان » تقرر أن : « س إنسان يلزم عنها س فان » قضية صادقة لجميع قيم س التى تنطبق عليها ، والتى قد تسمى بالقيم المقبولة admissible . ودوال القضايا مثل « س عدد » لها خاصية أنها تبدو كالقضايا ، ويظهر أنها قادرة على استلزام دوال قضايا أخرى ، مع أنها ليست صادقة أو كاذبة . الواقع هى قضايا لجميع قيم المتغير المقبولة ، ولكنها لا تكون كذلك حين يظل المتغير متغيراً دون أن تعيَّن قيمته . ومع أنها قد يلزم عنها لكل قيمة مقبولة للمتغير القيمة المناظرة لدالة قضية

(١) وهذه هى التى سميناها فى الجزء الأول دوال القضايا .

أخرى مَّا ، إلا أنها لا يلزم عنها شيء حين يظل المتغير كمتغير . الحق إن مسألة طبيعة دالة القضية باعتبار أنها فى مقابل القضية ، وبوجه عام للدالة فى مقابل قيمها ، مسألة عويصة لا يمكن حلها إلا بتحليل طبيعة المتغير . ومع ذلك فمن المهم ملاحظة أن دوال القضايا كما بينا فى الباب السابع أساسية أكثر من الدوال الأخرى بل أكثر من العلاقات . هذا ومن المناسب لتحقيق معظم الأغراض أن نطابق بين الدالة والعلاقة . فمثلا إذا كان ص = د (س) تكافئ س ع ص ، حيث ع علاقة ، فمن المناسب أن نصف ع بأنها الدالة ، وهذا ما سنفعله فيما بعد . ومع ذلك ينبغى أن يذكر القارئ أن فكرة الدالية أكثر أساسية من العلاقة . وقد بحثنا فى هذه النقطة من قبل فى الجزء الأول واستوفينا فيها الكلام لبيان كيف يمكن أن تكون القضية دالة متغير .

وتقدم لنا معاجم اللغة أمثلة أخرى على الدوال غير العددية . فالتعبير الفرنسى عن لفظة ما هو دالة التعبير الإنجليزى ، والعكس بالعكس ، وكلاهما دالتان للحد الذى يدلان عليه . وجذاذة كتاب فى كتالوج مكتبة هى دالة الكتاب ، والعدد فى شفرة دالة اللفظة التى تنوب عنها . وفى جميع هذه الأحوال هناك علاقة يصبح بها المتعلق فريداً (أو فى حالة اللغات فريداً على العموم) حين يعطى المتعلق به . ولكن حدود المتغير المستقل لا تكون متسلسلة إلا فى الترتيب الخارجى البحت الناشئ عن الأبجدية .

٢٥٥ – ولنشرع الآن فى البحث عن التخصيص الثانى ، وهو أن المتغير المستقل سيفضى إلى متسلسلة . فى هذه الحالة المتغير التابع لمتسلسلة بالترابط ، وقد يكون أيضاً متسلسلة مستقلة . مثال ذلك أن المواضع التى تشغلها نقطة مادية فى متسلسلة من اللحظات تكون متسلسلة بالترابط مع اللحظات التى هى دالة لها . ولكن بسبب اتصال الحركة فإنها كقاعدة تكون أيضاً متسلسلة هندسية مستقلة عن كل تعلق بالزمان . وبذلك تقدم الحركة أروع مثال على ترابط المتسلسلة . وفى الوقت نفسه توضح علامة هامة جداً إذا وجدت أمكننا القول إن المتسلسلة غير مستقلة . فعندما يعرف الزمن يتحدد على انفراد وضع الجسم المادى ، ولكن حين يعطى الوضع فقد تكون هناك لحظات عدة ، أو حتى عدد لامتناه منها تناظر الوضع المعطى .

(سيكون هناك عدد لا متناه من مثل هذه اللحظات إذا كان الجسم ساكناً فى الوضع المذكور . والسكون rest تعبير فضفاض مبهم ، ولكنى أرجئ البحث فيه إلى الجزء السابع) . وبذلك لا تكون علاقة الزمن بالوضع علاقة واحد بواحد بالضبط ، بل قد تكون علاقة كثير بواحد . وقد كانت هذه الحالة موضع بحثنا عند عرضنا العام للترابط ، من حيث تنشأ عنه المتسلسلة التابعة . وانتهينا كما نذكر إلى أن المتسلسلتين المستقلتين المترابطتين هما رياضياً فى نفس المستوى ، لأنه إذا كانت ق ، ل علاقتيهما المولدتين ، ع علاقة الترابط ، استنتجنا أن ق = ع ل ع̆ من ل = ع̆ ق ع . ويبطل هذا الاستنتاج إذا لم تكن ع علاقة واحد بواحد بالضبط ، إذ عندئذ لا نحصل على ع ع̆ داخلة فى ١ ، رقم واحد حيث ١ ، يعنى التطابق . مثال ذلك أن ابن والدى ليس من الضرورى أن أكون أنا ، ولو أن والد ابنى لابد أن يكون أنا . وهذا يوضح لنا هذه الحقيقة وهى أنه إذا كانت ع علاقة كثير بواحد ، فينبغى أن نميز بعناية بين ع ع̆ ، ع̆ ع ، لأن الصورة الأخيرة داخلة فى التطابق دون الأولى . فحيثما كانت ع علاقة كثير بواحد فقد يمكن استخدامها لتكوين متسلسلة بالترابط . ولكن المتسلسلة المتكونة على هذا النحو لا يمكن أن تكون مستقلة . وهذه نقطة هامة تقضى تماماً على النظرية العلاقية للزمن [١] .

ولنرجع الآن إلى حالة الحركة . عندما يقطع الجسم منحنى مغلقاً ، أو منحنى له نقط مزدوجة ، أو عندما يكون الجسم فى حالة سكون أحياناً أثناء زمن متناه ، عندئذ تكون متسلسلة النقط التى يشغلها متسلسلة بالترابط أساساً لا متسلسلة مستقلة . ولكن كما لاحظت من قبل نحن لا نحصل على المنحنى بالحركة فقط ، بل هو أيضا شكل هندسى بحت يمكن تعريفه دون إشارة لأية نقطة مادية مفروضة . مع ذلك فحين يعرف المنحنى على هذا النحو ، فلا يجب أن يشتمل على نقط من السكون : لأن طريق النقطة المادية التى تتحرك أحياناً ، ولكنها تكون أحياناً فى سكون بعض الوقت ، مختلف حين نعتبرها كينماتيكيا وحين نعتبرها هندسياً . إذ هندسياً النقطة التى فيها سكون هى نقطة واحدة ، على حين أنها كينماتيكيا تناظر حدوداً كثيرة فى المتسلسلة .

وتوضح المناقشة السالفة للحركة بمثال غير عددى حالة تقع عادة فى دوال

(١) انظر مقالتى « هل الوضع فى الزمان والمكان مطلق أو نسبى ؟ » فى مجلة Mind, July 1901.

الرياضيات البحتة . وهذه الدوال (حين تكون دوال لمتغير حقيقى) تحقق فى العادة الشروط الآتية : أن المتغير المستقل والتابع كليهما فصلان للأعداد ، وأن العلاقة المعرفة للدالة علاقة كثير بواحد[1]. وهذه الحالة تشمل الدوال المنطقة ، والدوال الدائرية والناقصية للمتغير الحقيقى ، والغالبية العظمى للدوال المباشرة فى الرياضيات البحتة . وفى جميع هذه الأحوال يكون المتغير المستقل متسلسلة أعداد يمكن أن نقصرها على أى وجه نشاء — على الأعداد الموجبة ، أو المنطقات ، أو الأعداد الصحيحة ، أو الأعداد الأولية ، أو أى فصل آخر . والمتغير التابع يتكون أيضاً من أعداد ، غير أن ترتيب هذه الأعداد تحدده علاقتها بالحد المناظر للمتغير المستقل لا بالأعداد المكونة للمتغير التابع ذاتها . وفى عدد كثير من الدوال قد يحدث أن يتفق الترتيبان ، وفى غيرها حيث يوجد نهايات عظمى وصغرى على أبعاد متناهية ، يتفق الترتيبان على طول امتداد متناه ثم ينقلبان متقابلين تماماً على طول امتداد متناه آخر ، وهكذا . فإذا كان س المتغير المستقل ، ص المتغير التابع ، وكانت العلاقة المكونة علاقة كثير بواحد ، فإن نفس العدد ص سيكون بوجه عام دالة لأعداد كثيرة من س ، أى مناظراً لها . ولذلك نحصل على متسلسلة ص بالترابط ضرورة ، ولا يمكن أن تؤخذ على أنها متسلسلة مستقلة . فإن شئنا بعد ذلك أن نبحث فى عكس الدالة التى تعرف بعكس العلاقة احتجنا إلى تدابير معينة إذا كنا لا نزال نريد الحصول على ترابط المتسلسلة . وأحد هذه التدابير الذى يبدو أعظمها أهمية يقوم على تقسيم قيم س المناظرة لنفس قيمة ص إلى فصول ، بحيث يمكن أن نميز مثلا ن من السينات المختلفة ، كل منها له علاقة واحد بواحد متميزة مع ص ؛ وبذلك يمكن أن تنعكس ببساطة . وهذا هو الطريق المعتاد مثلا لتمييز الجذور التربيعية الموجبة والسالبة . وهذا ممكن حيثما كانت العلاقة المولدة لدالتنا الأصلية قادرة صورياً على الظهور كانفصال لعلاقات الواحد بالواحد ومن الواضح أن العلاقة الانفصالية disjunctive المكونة من ن من علاقات واحد بواحد كل منها تشتمل فى ميدانها على فصل معين ى ستكون على طول الفصل ى علاقة ن بواحد . وهكذا قد يحدث أن ينقسم المتغير المستقل إلى ن من الفصول وفى داخل كل واحد منها العلاقة المعرفة هى علاقة واحد بواحد ، أى فى داخل كل

---

(١) واستبعد فى الوقت الحاضر المتغيرات المركبة التى تؤدى مع إدخال الأبعاد إلى تعقيدات من نوع متميز تماماً .

منها لا يوجد إلا س فقط له مع ص المعينة العلاقة المعرفة . وفى مثل هذه الأحوال المعتادة فى الرياضيات البحتة يمكن أن تجعل علاقة الكثير بالواحد انفصالا لعلاقات الواحد بالواحد التى ينعكس كل منها على انفراد . أما فى حالة الدوال المركبة ، فهذه مع بعض التغييرات الضرورية طريقة سطوح ريمان Riemann . إلا أنه لابد من أن نذكر بوضوح أنه حيث لا يكون دالتنا واحد بواحد بالطبع ، فإن ص الذى يظهر كمتغير تابع ، يكون عادة متميزاً عن ص الذى يظهر كمتغير مستقل فى الدالة العكسية .

الملاحظات السابقة التى سنزيدها توضيحاً مع سيرنا فى البحث قد بينت فيما أرجو الارتباط الوثيق بين ترابط المتسلسلات ، وبين الاستخدام الرياضى العادى للدوال . وسنصادف كثيراً من الحالات الأخرى على أهمية الترابط خلال البحث . هذا ويمكن أن نلاحظ أن كل فصل معدود يتعلق بدالة أحادية القيم one - valued function مع الأعداد الصحيحة المتناهية ، والعكس بالعكس . وحيث أن هذا الفصل مرتب بالترابط مع الأعداد الصحيحة فإنه يصبح متسلسلة لها صنف الترتيب الذى يسميه كانتور ω . وستظهر أهمية الترابط الأساسية بالنسبة لنظرية كانتور عن الأعداد المتصاعدة حين نعرض لتعريف الترتيبيات المتصاعدة.

٢٥٦ — وبمناسبة البحث فى الدوال يبدو من المناسب أن نذكر شيئاً عن الصيغة وضرورتها للتعريف. كانت الدالة أساساً وبعد أن بطلت أن تكون مجرد قوة power ، شيئاً يمكن التعبير عنه فى صيغة . وكان من المعتاد البدء بعبارة تشتمل على متغير س ، دون ذكر شىء عن ماهية س خلاف هذا الفرض المفهوم ضمناً من أن س نوع ما من العدد . وأى تحديدات بعد ذلك لـ س فهى مشتقة إن وجدت من الصيغة نفسها ، ولذلك اتجهت الرغبة إلى استبعاد مثل تلك التحديدات التى أفضت إلى تعميمات شتى عن العدد . هذا التعميم الجبرى[1] حل الآن محله بحث أكثر ترتيبياً تعرف فيه جميع الفصول بواسطة الأعداد الصحيحة ، دون أن تدخل الصيغ فى العملية . ومع ذلك فللصيغة أهمية خاصة عند استخدام الدوال حيث تكون المتغيرات المستقلة والتابعة فصولاً لا متناهية . ولنشرع الآن فى بحث تعريف الصيغة .

---

(١) وأحسن ما كتب منه نجده فى كتاب كوتيراه
Couturat, De L'Infini Mathématique, Paris, 1896, Part 1, Book II

الصيغة بمعناها العام جداً قضية أو الأحرى دالة قضية تشتمل على متغير أو أكثر من متغير ، حيث أن المتغير هو أى حد فى فصل معرف ، أو حتى أى حد بغير تقييد . ونوع الصيغة الداخلة فى الدوال ذات المتغير المفرد هى صيغة تشتمل على متغيرين، فإذا عرّفنا كلا المتغيرين، كأن يكون أحدهما منتمياً للفصل ى والآخر للفصل ف ، كانت الصيغة صادقة أو كاذبة . فهى صادقة إذا كان كل ى له مع كل ف العلاقة المعبر عنها بالصيغة ، وإلا فهى كاذبة . ولكن إذا كان أحد المتغيرات ، وليكن سہ ، معرفاً على أنه ينتمى للفصل ى ، على حين لا يعرف المتغير الآخر صہ إلا بواسطة الصيغة ، عندئذ يمكن اعتبار الصيغة معرفة صہ كدالة ا سہ . ولنسم الصيغة فہ س ص . فإذا كان فى الفصل ى حدود هى سہ بحيث لا يوجد حد هو ص يجعل فہ س ص قضية صادقة ، فالصيغة فيما يختص بتلك الحدود مستحيلة . ينبغى إذن أن نفترض أن ى فصل كل حد فيه لقيمة مناسبة من قيم صہ يجعل القضية فہ س ص صادقة . فإذا وجد لكل حد سہ فى الفصل ى بعض الأشياء هى ص تجعل فہ س ص صادقة ، وأشياء أخرى لا تجعلها كذلك ، عندئذ فہ س ص تربط مع كل سہ فصلا معيناً من الحدود هو صہ . وبهذه الطريقة تعرف صہ كدالة سہ .

ولكن المعنى العادى « للصيغة » فى الرياضيات يستدعى عنصراً آخر يمكن أن يعبر عنه أيضاً بلفظة « القانون » law . ومن الصعوبة أن نذكر بالضبط ما هذا العنصر ، ولكن يظهر أنه ينطوى إلى حد كبير على تبسيط شديد للقضية فہ س ص . وفى حالة وجود لغتين مثلا فقد يقال إنه لا توجد صيغة تربطهما سوى الحالات فى مثل قانون جريم Grimm's law [1] . فإذا صرفنا النظر عن المعاجم ، فإن العلاقة التى بها تترابط الألفاظ فى شتى اللغات هى عينية sameness المعنى . ولكن هذا لا يعطينا أى طريقة بها نستنتج حين نعلم لفظة فى إحدى اللغات اللفظة المناظرة لها فى لغة أخرى . فما نفقده ههنا هو إمكان الحساب . أما الصيغة ، (لتكن صہ =

---

(١) هو قانون تباديل الحروف الساكنة فى اللغات الآرية ، وأول من وضعه جريم فى كتابه *Deutsche Grammatik* أى النحو الألمانى ، سنة ١٨٢٢ . وطبقاً لهذا القانون حرف p فى اللغات اليونانية واللاتينية والسنسكريتية يصبح حرف f فى اللغة القوطية . وحرف t يصبح th . مثال ذلك **Pater** تصبح father . (المترجم)

٢ س ر) فإنها تسلحنا بالوسيلة التى بها حين نعرف س أن نكتشف ص . وأما فى حالة اللغات فطريقة الإحصاء وحدها لجميع الأزواج هى التى تعرِّف المتغير التابع . وفى حالة الصيغة الجبرية ، يمكننا المتغير المستقل والعلاقة من معرفة كل شىء عن المتغير التابع . فإذا وجب أن تمتد الدوال حتى تشمل الفصول اللامتناهية كان الأمر السابق أساسياً، لأن الإحصاء أصبح مستحيلا . فمن الجوهرى إذن لترابط الفصول اللامتناهية ، ولبحث دوال الفصول اللامتناهية أن تكون الصيغة ف س ص بحيث إذا علمت س أمكن أن نكتشف فصل حدود ص الذى يحقق الصيغة . واعترف بعجزى عن إعطاء بيان منطقى لهذا الشرط ، وأظن أنه أمر نفسانى بحت . ومع أن أهميته العملية كبيرة، إلا أن أهميته النظرية مشكوك فيها كثيراً فيما يظهر .

ومع ذلك هناك شرط منطقى يتصل بالمسألة السابقة على الرغم من أنه ربما لم يكن مطابقاً له تماماً . فإذا علم أى حدين فهناك علاقة مَّا تقوم بينهما لا غير . ويترتب على ذلك أنه إذا علم أى فصلين للحدين ى ، ف ، فهناك علاقة انفصالية تقوم بين أى حد واحد من ى وبين على الأقل حد واحد من ف ، ولا تقوم بين أى حد غير داخل فى ى وبين أى حد . وبهذه الطريقة حين يكون الفصلان كلاهما متناهياً ، يمكن أن نجرى ترابطاً (قد يكون ترابط واحد بواحد ، أو كثير بواحد أو واحد بكثير) يربط حدود هذين الفصلين ولا غير . وبهذا السبيل ، أى منظومة من الحدود فهى نظرياً دالة أى منظومة أخرى ، وبهذا فقط مثلا توضع الشفرة الدبلوماسية . ولكن إذا كان عدد الحدود فى الفصل المكوِّن للمتغير المستقل لا متناهياً ، فلا يمكننا عملياً بهذه الطريقة تعريف الدالة ، إلا إذا كانت العلاقة الانفصالية تشتمل على علاقات ينشأ إحداها من الأخرى بقانون ، وفى هذه الحالة إنما تنقل الصيغة إلى العلاقة . وبعبارة أخرى لا يجب أن تكون العلاقة المعرفة للدالة مركبة إلى ما لا نهاية له ، أو إذا كانت كذلك فينبغى أن تكون هى ذاتها دالة معرفة بعلاقة ما مركبة تركيباً متناهياً . ومع أن هذا الشرط هو نفسه منطقى فليست ضرورته فيما أظن إلا نفسانية . وبمقتضى هذا الشرط لا نستوعب اللامتناهى إلا بواسطة قانون الترتيب . ومناقشة هذه النقطة تتطلب مناقشة علاقة اللانهاية بالترتيب — وهى مسألة سنستأنف القول فيها فيما بعد ، إذ لم نتهيأ الآن لبحثها ببصيرة . على كل حال يمكن أن نقول إن الصيغة التى تشتمل على متغيرين ودالة

معرِّفة فلابد إذا وجب أن تكون مجدية ، أن تعطى علاقة بين المتغيرين بمقتضاها إذا علم أحدهما أمكن الكشف عن جميع القيم المناظرة للآخر . ويظهر أن هذا يكوِّن الجوهر الرياضى لجميع الصيغ .

٢٥٧ ـ بقيت فكرة منطقية متميزة تماماً بالغة الأهمية فى صلتها بالنهايات نعنى فكرة المتسلسلة التامة complete . إذا كانت ع العلاقة المعرفة لمتسلسلة، كانت المتسلسلة تامة حين يوجد حد س ينتمى إلى المتسلسلة بحيث يكون كل حد آخر له مع س إما العلاقة ع ، أو العلاقة عَ منتميا للمتسلسلة ، فهى « متواصلة connected » (كما شرحنا فى الجزء الرابع) حين لا ينتمى أى حد آخر إلى المتسلسلة . فالمتسلسلة التامة تتكوَّن من تلك الحدود ولا غير التى لها العلاقة المولدة أو عكسها لحد واحد معًا بالإضافة إلى هذا الحد الواحد . وما دامت العلاقة متعدية فالمتسلسلة التى تحقق هذا الشرط لأحد حدودها تحققه كذلك لجميع حدودها . والمتسلسلة التى تكون موصولة ، ولكن ليست تامة، سنسميها غير تامة incomplete ، أو جزئية . ومن أمثلة المتسلسلات التامة الأعداد الصحيحة الأصلية ، أو الأعداد الصحيحة الموجبة والسالبة والصفر ، أو الأعداد المنطقة ، أو لحظات الزمان ، أو النقط على خط مستقيم . وأى اختيار من مثل هذه المتسلسلات فهو غير تام بالنسبة للعلاقات المولدة للمتسلسلات التامة المذكورة . مثال ذلك الأعداد الموجبة متسلسلة غير تامة ، وكذلك المنطقات بين ٠ ، ١ . وإذا كانت المتسلسلة تامة فلا يمكن أن يأتى حد قبل أو بعد أى حد فى المتسلسلة ، دون أن ينتمى إليها ، ولا يكون الحال كذلك إذا كانت المتسلسلة غير تامة . وقد تكون المتسلسلة تامة بالنسبة لعلاقة مولدة واحدة ، ولكن لا بالنسبة لعلاقة أخرى . فالأعداد الصحيحة المتناهية متسلسلة تامة حين تعرف المتسلسلة بقوى علاقة التعاقب ، كما بينا فى مناقشة المتواليات فى الجزء الرابع ؛ أمَّا حين ترتب بترابط الكل بالجزء ، فلا تكوِّن إلا جزءاً من متسلسلة الأعداد الصحيحة المتناهية والمتصاعدة ، كما سنرى فيما بعد . ويمكن أن تعتبر المتسلسلة التامة شاملة امتداد حد له نسبة مع علاقة معلومة وهذا الحد نفسه معاً ، وبالنظر إلى هذه الحقيقة فلها كما سنرى بعض الفروق الهامة عن المتسلسلات غير التامة الترتيبية الشبيهة . ولكن يمكن أن نبين بمنطق العلاقات أن أى متسلسلة غير تامة فيمكن أن نقلبها تامة بتغيير فى العلاقة المولدة، والعكس بالعكس. ومن هذا يتبين أن التمييز بين المتسلسلات التامة وغير التامة يرجع أساساً إلى علاقة مولدة معلومة .

الباب الثالث والثلاثون

الأعداد الحقيقية

٢٥٨ – قد يدهش الفلاسفة بعد كل ما قيل عن الأعداد حين يجدون أنهم إنما يستطيعون الآن فقط أن يعلموا شيئاً عن الأعداد « الحقيقية » . وستنقلب دهشتهم فزعاً حين يعلمون أن « الحقيقى » يقابل « المُنْطَق » . ولكن ستطمئن قلوبهم عندما يعلمون أن الأعداد الحقيقية ليست بالحقيقة أعداداً على الإطلاق ، بل شيئاً مختلفاً كل الاختلاف .

تشتمل متسلسلة الأعداد الحقيقية بحسب تعريفها الترتيبى على المجموع الشامل للأعداد المنطقة واللامنطقة ، من حيث أن اللامنطقات تعرف بأنها نهايات المتسلسلات المنطقة التى ليس لها نهاية منطقة أو لا متناهية . ومع ذلك فهذا التعريف يقدم صعوبات عويصة سنتولى بحثها فى الباب القادم . والرأى عندى أننى لا أجد أى سبب لافتراض وجود أعداد لامنطقة بالمعنى المذكور ، وحتى إذا وجدت فيبدو مما لا ريب فيه أنها لا يمكن أن تكون أكبر من الأعداد المنطقة أو أصغر منها . وحين أجرى الرياضيون تعميماً خاصاً بالعدد ، فهم جديرون بأن يكونوا فى غاية التواضع بشأنه – فهم يظنون أن الفرق بين الأفكار المعممة والأصلية أقل مما هو فى الواقع . وقد رأينا من قبل أن الأصليات المتناهية لا يجب أن نطابق بينها وبين الأعداد الصحيحة الموجبة ، بل ولا بينها وبين نسب الأعداد الطبيعية إلى ١ ، وكلاهما يعبر عن علاقات لا تعبر عنها الأعداد الطبيعية . وبالمثل يوجد عدد حقيقى مرتبط بكل عدد مُنْطق ، ولكنه متميز عنه . والعدد الحقيقى فيما سأفترض ليس شيئاً آخر سوى فصل معين من الأعداد المنطقة . ففصل المنطقات التى أقل من $\frac{1}{2}$ عدد حقيقى مرتبط بالعدد المنطق $\frac{1}{2}$. ولكنه من الواضح ليس متطابقاً معه . وهذه النظرية لا يؤيدها صراحة فيما أعلم أى مؤلف آخر ، ولو أن بيانو يوحى بها ، ويقترب كانتور اقتراباً شديداً منها[1] . والأسباب التى أستند إليها فى تأييد هذا الرأى

---

(١) انظر Gantor, Mathem. Annalen, VOL. XL VI, § 10; Peano, Rivista di Matematica, VOL VI, pp. 126 – 140, esp. p. 133.

هى أولا أن مثل هذه الفصول من المنطقات لها جميع الخواص الرياضية التى تنسب عادة للأعداد الحقيقية ؛ وثانياً أن النظرية المقابلة تعرض صعوبات يظهر لى أنها لا تحل . وسنناقش النقطة الثانية فى الباب التالى ، أما الآن فسأقتصر على عرض وجهة نظرى فقط ، محاولا أن أبين أن الأعداد الحقيقية بهذا المعنى لها جميع الخصائص المطلوبة . وأحب أن أنبه على أن هذه النظرية مستقلة عن مذهب النهايات الذى لن نعرض لبحثه إلا فى الباب القادم .

٢٥٩ ــ الأعداد المنطقة بترتيب المقدار تكوّن متسلسلة فيها حد بين أى حدين. ومثل هذه المتسلسلة التى سميناها مؤقتاً فى الجزء الثالث متصلة continuous ، يجب أن نطلق عليها الآن اسماً آخر ، لأننا سنحتفظ بلفظة «المتصل» continuous للمعنى الذى خصصه كانتور لها . واقترح أن أسمى مثل هذه المتسلسلة ملتحمة compact. فالأعداد المنطقة تكوّن إذن متسلسلة ملتحمة. ويجب ملاحظة أنه يوجد فى المتسلسلة الملحمة عدد لامتناه من الحدود بين كل حدين ، ولا توجد حدود متعاقبة ، وأن الامتداد stretch بين أى حدين (كانا داخلين أو لا) هو مرةً أخرى متسلسلة ملتحمة . ولننظر الآن فى أى عدد واحد منطق [١]، وليكن ر ، فى استطاعتنا بالعلاقة مع ر تكوين أربعة فصول لا متناهية من المنطقات : (١) الأصغر من ر (٢) التى ليست أكبر من ر (٣) الأكبر من ر (٤) التى ليست أصغر من ر . ويختلف (٢) ، (٤) عن (١) ، (٣) على التوالى بشىء واحد فقط هو أن الأولين تشتملان على ر ولا يشتمل الآخران عليها . ولكن هذه الحقيقة تفضى إلى فروق غريبة فى الخواص . ذلك أن (٢) له حد أخير ، على حين أن (١) ليس له ؛ و (١) متطابق مع فصل الأعداد المنطقة الأصغر من حد متغير فى (١) ، وليست لـ (٢) هذه الخاصية . وتنطبق ملاحظات شبيهة بذلك على (٣) و (٤) ولكن هذين الفصلين أهميتهما أقل فى الحالة الراهنة من (١) و (٢) . وفصول المنطقات التى لها خواص (١) تسمى قطع segments .

---

(١) مثل هذه المتسلسلات يسميها كانتور überall dicht

(٢) سأقتصر بالكلية على المنطقات الخالية العلامة للتبسيط . أما إدخال المنطقات الموجودة أو السالبة فلا يثير أى صعوبة .

والقطعة من المنطقات يمكن أن تعرف بأنها فصل المنطقات الذى ليس صفراً . ومع ذلك ليس متماداً cœxtensive مع المنطقات نفسها (أى الذى يشتمل على بعض المنطقات لا كلها) ، والذى يكون متطابقاً مع فصل المنطقات الأصغر من حد (متغير) هو أحد حدودها ، أى مع فصل المنطقات سَ بحيث يوجد منطق صَ فى الفصل المذكور بحيث أن سَ أصغر من صَ[1] . وسنجد الآن أننا نحصل على القطع بالطريقة المذكورة لا من المنطقات المفردة فقط . بل أيضاً من فصول المنطقات المتناهية أو اللامتناهية . بشرط أنه فيما يختص بالفصول اللامتناهية يجب أن يوجد منطق ما أكبر من أى عضو فى الفصل . ويجرى ذلك ببساطة على النحو التالى :

ليكن ى أى فصل من المنطقات المتناهية أو اللامتناهية . عندئذ يمكن تعريف أربعة فصول بعلاقتها مع ى[2] . وهى (١) الأصغر من كل ى (٢) الأصغر من أحد متغيرات ى (٣) الأكبر من كل ى (٤) الأكبر من أحد متغيرات ى . أى الفصول التى تكون بحيث يوجد لكل منها حد من ى أصغر منها . فإذا كان ى فصلا متناهياً ، فيجب أن يكون له حد أكبر وحد أصغر . وفى هذه الحالة الأولى وحده يدخل فى (٢) و (٣) والآخر وحده فى (١) و (٤) . وهكذا ترد هذه الحالة إلى الأولى التى كان لنا فيها منطق مفرد فقط . سأفترض إذن فى المستقبل أن ى فصل لامتناه . ثم لكى أستبعد الرد للحالة الأولى سأفترض عند بحث (٢) و (٣) أن ى ليس له حد أكبر . وبعبارة أخرى كل حد من حدود ى أصغر من حد آخر من حدود ى . وعند بحث (١) و (٤) سأفترض أن ى ليس له حد أصغر . وسأقتصر الآن على (٢) و (٣) وافترض ، بالإضافة إلى غياب الحد الأكبر ، وجود منطقات أكبر من ى ، أى وجود الفصل (٣) . وفى ضوء هذه الظروف يكون الفصل (٢) قطعة . ذلك أن (٢) يشتمل على جميع المنطقات التى هى أصغر من متغيرات ى ويترتب على ذلك أولا أنه ما دام ى ليس له حد كبر maximun ، فإن(٢)يشتمل على جميع ى . وثانياً ما دام كل حد فى (٢) أصغر

---

(١) انظر Formulaire de Mathématique, Vol. II, Part III. § 61 (Turin, 1899).

(٢) يمكن تعريف ثمانية فصول ، ولكننا لا نحتاج إلا إلى أربعة .

من بعض ى . الذى ينتمى بدوره إلى (٢) . فإن كل حد فى (٢) أصغر من حد آخر مـّا فى (٢) . وكل حد أصغر من أى حدمـّا فى (٢) فهو من باب أولى أصغر من بعض ى ، ويكون على ذلك حداً فى (٢) . ويترتب على ذلك أن(٢) متطابق مع فصل الحدود الأصغر من حد ما فى (٢) ، فيكون بذلك قطعة .

نخلص من ذلك إلى النتيجة الآتية : إذا كان ى منطقاً مفرداً ، أو فصل منطقات كلها أصغر من منطق ثابت مـّا . فإن المنطقات الأصغر من ى إذا كان ى حداً مفرداً ، أو أصغر من حد متغير من حدود ى إذا كان ى فصلا من الحدود ، تكون دائماً قطعة من المنطقات . فالذى أذهب إليه هو أن قطع المنطقات هو عدد حقيقى .

٢٦٠ — الطريقة التى استخدمت حتى الآن طريقة يمكن إستخدامها فى أى متسلسلة ملتحمة . وستعتمد بعض النظريات فى بحثنا التالى على أن المنطقات متسلسلة معدودة denumerable . وسأرجئ فى الوقت الحاضر حل النظريات المعتمدة على هذه الحقيقة . وأشرع فى بحث خواص قطع المنطقات .

رأينا أن بعض القطع تشتمل على المنطقات التى هى أصغر من منطق معلوم . وسنجد أن بعضها ولو أنها لم تعرف حسب هذا التعريف إلا أنها مع ذلك ممكنة التعريف على هذا النحو . مثال ذلك المنطقات الأصغر من حد متغير من المستلسلة ٠,٩ ، ٠,٩٩ ، ٠,٩٩٩ إلخ فهى نفس المنطقات الأصغر من ١ ؛ ولكن القطع الأخرى التى تناظر ما يسمى عادة باللامنطقات لا تقبل مثل هذا التعريف . وسنرى فى الباب التالى كيف أدت بنا هذه الحقيقة إلى اللامنطقات. والذى إنما أود بيانه فى الوقت الحاضر فهو هذه الحقيقة المعروفة جيداً من أن القطع قاصرة عن ترابط الواحد بالواحد مع المنطقات. وهناك فصول من المنطقات تعرف على أنها مؤلفة من جميع الحدود الأصغر من حد متغير مـّا فى فصل لا متناه من المنطقات . والتى لا تقبل التعريف كجميع المنطقات الأصغر من منطق واحد معرف[1] . وفضلا عن ذلك هناك قطع أكثر من المنطقات . ومن ثم كان لمتسلسلة القطع اتصال أعلى ترتيباً من المنطقات . والقطع تكون متسلسلات بفضل علاقة الكل بالجزء . أو بفضل علاقة

(١) انظر الجزء الأول . الباب الخامس ص ١١١ الترجمة العربية .

الاستغراق (مع استبعاد التطابق) . فأى قطعتين فهما بحيث تكون إحداهما محوية تماماً فى الأخرى . وبفضل هذه الحقيقة تكونان متسلسلة . ويمكن بسهولة أن يبين أنهما يكونان متسلسلة ملتحمة . والأجدر بالنظر هو هذا : إذا طبقنا العملية المذكورة على متسلسلة قطع . تكوّن قطعاً من قطع بصلتها مع فصول قطع . وجدنا أن كل قطعة من قطع يمكن تعريفها بأنها جميع القطع المتضمنة فى قطعة معرفة معينة . وهكذا فإن قطعة القطع المعرفة بفصل قطع تتطابق دائماً مع قطعة القطع المعرفة بقطعة واحدة ما . وأيضاً فإن كل قطعة تعرف قطعة قطع يمكن أن تعرف بفصل لا متناه من القطع . وهاتان الخاصتان تجعلان متسلسلة القطع كاملة perfect بحسب لغة كانتور . غير أن تفسير هذا الاصطلاح يجب أن نرجئ شرحه إلى أن نبحث فى مذهب النهايات .

كنا نستطيع أن نعرف قطعنا بأنها جميع المنطقات الأكبر من حد مَّا فى الفصل ى من المنطقات . ولو كنا قد فعلنا ذلك واشترطنا أن ى ليس له حد أصغر . وأنه ليس هناك منطقات أصغر من كل ى . لكنا قد حصلنا على ما يمكن تسميته بالقطع العليا . باعتبارها متميزة عن النوع السابق الذى يمكن أن نسميه القطع الدنيا . وعندئذ كنا نجد قطعة دنيا تناظر كل قطعة عليا . وأن تلك القطعة الدنيا تشتمل على جميع المنطقات التى لا تشتمل القطعة العليا عليها . باستثناء منطق وحيد فى بعض الأحيان . سيوجد منطق واحد لا ينتمى إلى القطعة العيا أو الدنيا حين تعرف القطعة العليا بأنها جميع المنطقات الأكبر من منطق وحيد . وفى هذه الحالة ستشتمل القطعة الدنيا المناظرة على جميع المنطقات الأصغر من هذا المنطق الوحيد الذى لن ينتمى بذاته إلى أى قطعة من القطعتين . وما دام هناك منطق بين أى اثنين . فلا يمكن أن يكون فصل المنطقات التى ليست أكبر من منطق متطابقاً مع فصل المنطقات الأصغر من منطق آخر ما . ولا يمكن أبداً أن يكون فصل المنطقات الذى له حد أكبر قطعة . لذلك كان من المستحيل فى الحالة المذكوره أن نجد قطعة دنيا تشتمل على جميع المنطقات التى لا تنتمى للقطعة العليا المعلومة . ولكن حين لا يمكن أن تعرف القطعة العليا بمنطق وحيد . فمن الممكن دائماً أن نجد قطعة دنيا تشتمل على « جميع » المنطقات غير المنتمية للقطعة العليا .

ويمكن إدخال الصفر واللانهاية على أنهما حالات نهائية للقطع . ولكن فى

حالة الصفر يجب أن تكون القطعة من النوع الذى سميناه (١) سابقاً ، لا من النوع (٢) الذى ناقشناه هناك . ومن السهل أن نقيم فصلا من المنطقات بحيث يكون حدما من الفصل أصغر من أى منطق معلوم . وفى هذه الحالة لن يشتمل الفصل (١) على أى حد ، فيكون الفصل الصفرى . وهذا هو العدد الحقيقى صفر الذى ليس مع ذلك قطعة ، ما دمنا قد عرفنا القطعة بأنها فصل ليس صفراً . ولكى ندخل الصفر على أنه فصل من النوع الذى سميناه (٢) ، فيجب أن نبدأ بفصل صفرى من المنطقات . وحيث أنه لا منطق أصغر من حدمـا فى فصل صفرى من المنطقات ، فإن الفصل (٢) فى مثل هذه الحالة صفرى . وبالمثل يمكن أن ندخل العدد الحقيقى اللانهاية . وهذا مطابق لفصل المنطقات بأسره . فلو كان عندنا فصل ى من المنطقات بحيث لا منطق أكبر من جميع الياءات ، كان كل منطق داخلا فى فصل المنطقات الأصغر من بعض ى . أو مرة أخرى إذا كان عندنا فصل من المنطقات فيه حدمـا أصغر من أى منطق معين ، فالفصل الناتج (٤) (وحدوده أكبر من بعض ى) سيشتمل على كل منطق ، فيكون بذلك العدد الحقيقى اللانهاية . وهكذا يمكن إدخال كلا الصفر واللانهاية كحدين متطرفين بين الأعداد الحقيقية . ولكن ليس أى منهما قطعة حسب التعريف .

٢٦١ — يمكن تعريف قطعة معلومة بفصول مختلفة كثيرة من المنطقات . وليكن الفصلان ى ، ف لهما هذه القطعة كخاصة مشتركة . ويعرف الفصلان اللامتناهيان ى ، ف نفس القطعة الدنيا ، بشرط أنه إذا علم أى ى فكان هناك ف مـا أكبر منه ، وإذا علم أى ف فهناك ى ما أكبر منه . وإذا لم يكن لكل فصل حد أكبر ، فهناك أيضاً شرط « ضرورى » . عندئذ نطلق على الفصلين ى ، ف ما سماه كانتور صفة التماسك (zusammengehöring coherent) . ويمكن أن نبين بصرف النظر عن القطع أن علاقة التماسك متماثلة ومتعدية[١] . ومن ثم يجب أن تستنتج بمبدإ التجريد أن كليهما له مع حد ثالث ما علاقة مشتركة ليست لأى حد آخر . هذا الحد الثالث كما رأينا من المناقشة السابقة يمكن أن يؤخذ على أنه القطعة

---

(١) انظر Cantor Math. Annalen XLVI, and Rivista di Matematica, V, pp. 158 159.

التى يعرفها كلا الحدين الآخرين . ونستطيع أن نبسط معنى « التماسك » ليشمل الفصلين ى ، ف يعرف أحدهما قطعة عليا والآخر قطعة دنيا . ويشتملان فيما بينهما على جميع المنطقات باستثناء منطق واحد على الأكثر . ولا تزال ملاحظات شبيهة بذلك تنطبق بالضرورة على هذه الحالة .

وإذ قد تبين لنا الآن أن الخواص العادية للأعداد الحقيقية تنتمى لقطع المنطقات ، فلايوجد ثمة سبب رياضى للتمييز بين مثل هذه القطع وبين الأعداد الحقيقية . ويبقى أن نبحث عن طبيعة النهاية أولا . ثم عن نظريات اللامنطقات الجارية، ثم بعد ذلك عن الاعتراضات التى تجعل النظرية المذكورة سابقاً تبدو مفضلة .

ملحوظة : النظرية السابقة من المفروض أن مقالة بيانو المشار إليها قبلا شاملة لها [1].

وقد اهتديت إلى هذه النظرية التى أخذت بها من هذه المقالة ومن كتاب Formulaire de Mathématique. وفى هذه المقالة نجد تعاريف متفرقة عن الأعداد الحقيقية (الفقرة ٢ رقم ٥) وعن القطع (الفقرة ٨ . ٠) يجعلنا نعتقد أنهما متميزان . ولكننا بعد تعريف القطع نجد الملاحظة التالية (صفحة ١٣٣) : « والقطع بهذا التعريف إنما تختلف فى التسمية عن الأعداد الحقيقية » . ويشرع بيانو أولا فى إعطاء أسباب فنية بحتة للتمييز بين الاثنين بطريقة العلامات notation ، وهى أن جمع الأعداد الحقيقية وطرحها وغير ذلك لابد أن يجرى بطريقة مختلفة عن عمليات شبيهة يجب أن تطبق على القطع . ومن هنا يظهر أن وجهة النظر بأسرها التى دافعت عنها متضمنة فى هذه المقالة . ولكنها فى الوقت نفسه تفتقد بعض الوضوح ما دام يظهر من تعريف الأعداد الحقيقية أنها تعتبر نهايات فصول المنطقات ، على حين أن القطعة ليست بأى معنى نهاية فصل من المنطقات . وأيضاً فلم يذكر فى أى مكان — الواقع أنه بمقتضى تعريف الأعداد الحقيقية فلابد من استنباط الأمر المقابل — أنه لا عدد حقيقى يمكن أن يكون منطقاً ، ولا منطق يمكن أن يكون عدداً حقيقياً . وهذا يظهر حيث يبين (ص ١٣٤) أن ١ يختلف عن الكسور الصحيحة . (وليست هذه هى الحالة بالنسبة للعدد الحقيقى ١ حين

(١) "Sui Numeri Irrazionali", Rivista di Matematica, VI, pp. 126-140).

يتميز عن كل من العدد الصحيح ١ وعن العدد المنطق ١ : ١) ، أو أننا نقول إن ١ أصغر من $\sqrt{٢}$ (وفى هذه الحالة أقول إن ١ يجب أن يفسر على أنه فصل الكسور الصحيحة . فتؤخذ القضية عندئذ بهذا المعنى : الكسور الصحيحة هى بعض لا كل المنطقات الذى مربعها أصغر من ٢) . ثم يقول بعد ذلك : « العدد الحقيقى ولو أنه محدد بالقطعة ى ويحددها . فإنه يعتبر عادة نهاية القطعة أو طرفها أو حدها الأعلى » . مع أنه لا سبب لافتراض أن القطع التى ليس لها نهاية منطقة فلها نهاية على الإطلاق . وهكذا ولو أنه يعترف بإمكان إقامة نظرية كاملة عن اللامنطقات بواسطة القطع فيبدو أنه لا يدرك الأسباب (التى سنقدمها فى الباب التالى) التى من أجلها يجب أن نفعل ذلك — وهى أسباب أدنى فى الواقع إلى أن تكون فلسفية منها إلى أن تكون رياضية .

الباب الرابع والثلاثون

النهايات والأعداد اللامنطقة

٢٦٢ – يعتمد البحث الرياضى فى الاتصال اعتماداً كلياً على نظرية النهايات . وقد ظن بعض الرياضيين وبعض الفلاسفة أن هذه النظرية قد بطلت بظهور الحساب اللانهائى الذى أثبت أن اللانهائيات الصغر الحقيقية مفروضة قبلا فى النهايات[1] . ولكن الرياضيات الحديثة قد بينت قطعاً فيما يبدو لى خطأ مثل هذا الرأى ، وبرزت طريقة النهايات أكثر فأكثر باعتبار أنها أساسية . وفى هذا الباب سأعرض أولا التعريف العام للنهاية ، ثم أفحص فى أمر تطبيقها على إيجاد اللامنطقات .

عرفنا المتسلسلة الملتحمة بأنها تلك التى يوجد فيها حد بين أى حدين . ولكن فى مثل هذه المتسلسلة من الممكن دائماً وجود « فصلين » من الحدود ليس لهما حد يقع بينهما ، ومن الممكن دائماً رد « أحد» هذين الفصلين إلى حد مفرد. مثال ذلك إذا كانت ق العلاقة المولدة ، س أى حد من المتسلسلة. كان فصل الحدود الذى له مع س العلاقة ق فصلا ليس بينه وبين س أى حد[2]. وفصل الحدود المعرَّف على هذا النحو هو أحد القطعتين التى تعينهما س . وفكرة القطعة من الأفكار التى إنما تحتاج إلى متسلسلة فقط بوجه عام . وليس من الضرورى أن تكون متسلسلة عددية . وفى هذه الحالة إذا كانت المتسلسلة ملتحمة يقال إنَّ س « نهاية » الفصل. وحين يوجد مثل هذا الحد س ، يقال إن القطعة منتهية . وهكذا فإن كل قطعة منتهية فى متسلسلة ملتحمة فحدها المعرف يعد النهاية . ولكن هذا لا يؤلف تعريف النهاية ؛ ولكى نحصل على تعريف عام للنهاية فلنضع أى فصل مشمول فى المتسلسلة المتولدة من ق . عندئذ يكون الفصل ى بوجه عام بالنسبة لأى حد س لا ينتمى إليه منقسماً إلى فصلين ، أحدهما الذى لحدوده العلاقة ق مع س (وسأسميه فصل

---

(١) هذه مثلا وجهة نظر كوهين Cohen *Das Princip der Infinitesimal - Methode und seine Geschichte* Berlin 1883 See pp. 1, 2.

(٢) لعله من فائدة القول بيان أن الحد الموجود بين ى ، ب إذا كانت له العلاقة ق مع كل حد من حدود ى ، والعلاقة ق مع كل من حدود ب ، أو العكس بالعكس .

الحدود السابق على س) والآخر الذى لحدوده مع س العلاقة ى (وسأسميه فصل الحدود اللاحقة ل س) فإذا كان س نفسه حداً فى ى ، نظرنا إلى جميع حدود ى غير س ، فنجد أنها تنقسم إلى الفصلين المذكورين . ويمكن أن نسميها Π ى س ، و $\bar{\Pi}$ ى س على التوالى . فإذا كان Π ى س بحيث يكون ص أى حد سابق على س ، فهناك حد من Π ى س لاحق على ص . وبمعنى آخر بين س ، ص ، وعندئذ يكون س نهاية ل Π ى س . وبالمثل إذا كان $\bar{\Pi}$ ى س بحيث أنه إذا كان ط أى حد بعد س ، فهناك حد من $\bar{\Pi}$ ى س بين س ، ط ، عندئذ يكون س نهاية ل $\bar{\Pi}$ ى س . ونعرف الآن أن س نهاية ل ى إذا كانت نهاية إما ل Π ى س أو $\bar{\Pi}$ ى س . ويجب ملاحظة أن ى قد يكون له نهايات كثيرة ، وأن جميع النهايات معاً تكوّن فصلا جديداً مشمولا فى المتسلسلة التى تولدها ى . وهذا هو الفصل (أو بالأحرى أن هذا بتأييد بعض الفروض الأخرى المعنية يصبح الفصل) الذى يسميه كانتور بأنه أول مشتقات الفصل ى

٢٦٣ — وقبل أن نمضى فى البحث أكثر من ذلك يحسن التنبيه على بعض ملاحظات عامة ذات صفة أولية عن موضوع النهايات . فأولا النهايات تنتمى عادة لفصول مشمولة فى متسلسلات ملتحمة — فصول قد تكون فى الحالات المتطرفة متطابقة مع المتسلسلات الملتحمة المذكورة . وثانياً النهاية قد تنتمى وقد لا تنتمى للفصل ى الذى هى نهاية له . ولكنها تنتمى دائماً لمتسلسلة مَّا تشتمل على ى . فإذا كانت حداً من حدود ى فهى لا تزال نهاية للفصل المركب من جميع حدود ى ما عدا نفسها . وثالثاً لا فصل يمكن أن يكون له نهاية إلا إذا اشتمل على عدد لا متناه من الحدود . ولنرجع إلى قسمتنا السابقة فنقول : إذا كان ى متناهياً كان Π ى س ، $\bar{\Pi}$ ى س متناهيين . وبناء على ذلك كل منهما سيكون له حد هو أقرب حد من س ، ولن يقع بين هذا الحد وبين س أى حد من ى . ومن ثم ليس س نهاية ل ى ، وما دام س أى حد فى المتسلسلة . فلن يكون ل ى أى نهاية على الإطلاق . ومن الشائع إضافة نظرية تذهب إلى أن كل فصل لا متناه بشرط أن تكون جميع حدوده مشمولة بين حدين معينين من المتسلسلة المتولدة عن ى ، فلابد أن يكون له على الأقل نهاية واحدة . ولكن هذه النظرية كما سنبين تحتاج إلى تفسير فى ضوء القطع . وليست كما هى قائمة صحيحة . ورابعاً إذا كان

ى متمادأ مع المتسلسلة الملتحمة كلها المتولدة من ق . إذن كل حد من هذه المتسلسلة نهاية ا ى . ولا يمكن أن يكون هناك حدود أخرى هى نهايات بالمعنى نفسه ما دامت النهايات إنما عُرفت بعلاقتها مع هذه المتسلسلات الملتحمة . وللحصول على نهايات أخرى ينبغى أن نعتبر المتسلسلة المتولدة عن ق أنها تكون جزءاً من متسلسلة ملتحمة أخرى – وهى حالة قد تنشأ كما سنرى بعد . على أى حال إذا كان ى أى متسلسلة ملحتمة فكل حد من ى فهو نهاية ا ى . أما هل ى له أيضاً نهايات أخرى فأمر يتوقف على ظروف أخرى . وبوجه عام يمكن تعريف النهاية بأنها حد يتلو مباشرة (أو يسبق) فصلا ما من الحدود المنتمية لمتسلسلة لا متناهية ، دون أن يتلو مباشرة (أو يسبق حسب الأحوال) أى حد واحد من المتسلسلة . وبهذه الطريقة سنجد أن النهايات قد تعرف عموماً فى جميع المتسلسلات اللامتناهية التى ليست متواليات –كالحال مثلا فى متسلسلات الأعداد الصحيحة المتناهية والمتصاعدة .

٢٦٤ – نستطيع الانتقال الآن إلى بحث النظريات الحسابية المتعددة عن اللامنطقات والتى تعتمد كلها على النهايات . وهى فى صورتها المضبوطة التى وضعها لها أصحابها ، سنجد أنها جميعاً تتطلب بديهية تفتقر إلى أدلة سواء من جهة الضرورة الفلسفية أو المناسبة الرياضية . وتوجه إليها اعتراضات منطقية خطيرة ، وتستقل عنها تماماً نظرية الأعداد الحقيقية المبسوطة فى الباب السابق .

لم نستطع بحث النظريات الحسابية عن اللامنطقات فى الجزء الثانى ما دامت تعتمد أساساً على فكرة الترتيب . ولا تصبح الأعداد إلا بواسطتها متصلة بالمعنى المتداول الآن بين الرياضيين . وسنرى فى الجزء السادس أننا لا نحتاج إلى أى معنى آخر عن الاتصال فى بحث المكان والزمان . ومن المهم جدا أن نتبين الأسباب المنطقية التى من أجلها تكون النظرية الحسابية عن اللامنطقات ضرورية حتماً . وكان تعريف اللامنطقات فى الماضى خاضعاً فى العادة لاعتبارات هندسية . وقد كان ذلك الإجراء منافياً للمنطق إلى حد كبير . لأنه إذا وجب أن ينتج عن تطبيق الأعداد على المكان شىء خلاف التكرار فلابد أن تعرف الأعداد تعريفاً مستقلاً . وإذا لم يكن ممكناً سوى التعريف الهندسى ، فلن يكون بصراحة ثمة أشياء

حسابية كما يزعم التعريف تعريفها . والتعريف الجبرى الذى أدخلت فيه اللامنطقات كجذور لمعادلات جبرية ليس لها جذور منطقة . كان عرضة لاعتراضات شبيهة بذلك . إذ كان لابد من بيان أن مثل هذه المعادلات لها جذور . وفضلا عن ذلك فهذه الطريقة إنما تؤدى إلى ما يسمى بالأعداد الجبرية التى هى تناسب لانهائى الصغر للأعداد الحقيقية. وليس لها اتصال بحسب المعنى الذى ذهب إليه كانتور ، أو بحسب المعنى المطلوب فى الهندسة . وعلى أى حال إذا كان من الممكن دون أى افتراض آخر الانتقال من الحساب إلى التحاليل . من المنطقات إلى اللامنطقات ، فبيان كيفية إجراء هذا العمل يخطو بالمنطق أشواطاً إلى الأمام . إن تعميمات العدد — باستثناء إدخال الأعداد التخيلية التى يجب أن تجرى مستقلة — هى كلها نتائج ضرورية للتسليم بأن الأعداد الطبيعية تكوّن متوالية . فى كل متوالية يكون للحدود نوعان من العلاقات . نوع يكون الشبيه العام بالأعداد الموجبة والأعداد السالبة . والثانى بالأعداد المنطقة . والأعداد المنطقة تكون متسلسلة ملتحمة معدودة. وقطع المتسلسلة الملتحمة المعدودة تكون كما رأينا فى الباب السابق متسلسلة متصلة بالمعنى الدقيق . وهكذا كل شىء ينشأ من افتراض المتوالية . ولكن علينا فى الباب الحاضر أن نبحث فى اللامنطقات من جهة اعتمادها على النهايات ، وبهذا المعنى سنجد أنها لن تنشأ بغير افتراض جديد .

وهناك عدة نظريات شبيهة بذلك شيئاً ما عن الأعداد اللامنطقة ، وسأبدأ بعرض نظرية ديديكند[١] .

٢٦٥ — مع أن الأعداد المنطقة هى بحيث يكون دائماً بين كل عددين عدد ثالث . إلا أن هناك طرقاً كثيرة لتقسيم « جميع » الأعداد المنطقة إلى فصلين ، بحيث تأتى جميع أعداد فصل منهما بعد جميع أعداد الفصل الآخر . فلا يقع أى عدد منطق بين الفصلين . ومع ذلك لا يكون للفصل الأول حد أول ولا يكون للثانى حد أخير . مثال ذلك أن جميع الأعداد المنطقة بغير استثناء يمكن أن تصنف حسب مربعها أهو أكبر أو أصغر من ٢ . وجميع الحدود فى كلا الفصلين يمكن تنظيمها فى متسلسلة مفردة . يوجد فيها مقطع معين . يأتى قبله أحد

(١) Stetigkeit und irrationale Zahlen 2nd ed. Brunsvick 1892.

الفصلين ويأتى الآخر بعده . ويبدو أن الاتصال يتطلب أن يناظر حداً مَّا هذا المقطع . والعدد الذى يقع بين الفصلين يجب أن يكون عدداً جديداً ما دامت جميع الأعداد القديمة قد صنفت . وهذا العدد الجديد الذى يعرف بموضعه من المتسلسلة هو عدد لامنطق . فإذا أدخلت هذه الأعداد فليس هناك دائماً عدد بين أى عددين فقط . بل هناك عدد بين أى فصلين أحدهما يأتى بأسره بعد الآخر ، وليس للأول منهما حد أصغر بينما ليس للثانى حد أكبر . وهكذا يمكننا أن نطبق على الأعداد البديهية التى بها يعرف ديديكند اتصال الخط المستقيم (أنظر المرجع السابق ص ١١) .

« إذا أمكن تقسيم جميع نقط الخط إلى فصلين بحيث تكون كل نقطة من أحدهما على شمال كل نقطة من الفصل الآخر . فهناك نقطة واحدة لا غير يتم بها هذا التقسيم لجميع النقط إلى فصلين ، ولهذا المقطع من الخط إلى جزأين » .

٢٦٦ — ومع ذلك فبديهية ديديكند هذه ذات عبارة أدنى إلى أن تكون غير محكمة ، وتحتاج إلى إصلاح يوحى به اشتقاق الأعداد اللامنطقة . فإذا انقسمت « جميع » نقط خط إلى فصلين . فلن تنفرد نقطة بالبقاء لتمثل المقطع . وإذا قصد بلفظة « جميع » استبعاد النقطة التى تمثل المقطع ، فلن تميز البديهية المتسلسلات المتصلة بل تنطبق على السواء على جميع المتسلسلات . مثال ذلك متسلسلة الأعداد الصحيحة . ينبغى إذن أن نأخذ البديهية على أنها تنطبق بالنسبة للتقسيم المذكور لا على جميع نقط الخط . بل على جميع النقط المكونة لمتسلسلة ملتحمة مَّا ، وموزعة على طول الخط ، ولكنها تتكون فقط من قسم من نقط الخط . فإذا أجرينا هذا الإصلاح أصبحت البديهية مقبولة . ولو أمكن من بين حدود المتسلسلة إفراز بعضها لتكوين متسلسلة ملتحمة تتوزع على طول المتسلسلة السابقة ؛ ولو أمكن دائماً أن تنقسم هذه المتسلسلة الجديدة بطريقة ديديكند إلى قسمين لا يقع بينهما أى حد من المتسلسلة الجديدة . بل حد واحد لا غير من المتسلسلة الأصلية . عندئذ تكون المتسلسلة الأصلية متصلة بحسب المعنى الذى قصده ديديكند من هذه اللفظة . ومع ذلك فالإصلاح يهدم تماماً الوضوح الذاتى الذى عليه وحده اعتمد ديديكند (ص ١١) للبرهنة على بديهيته . من حيث تطبيقها على الخط المستقيم .

وهناك إصلاح آخر أقل بعض الشيء تعقيداً يمكن إجراؤه ويحقق فيما أظن ما « قصده » ديديكند من تقريره فى بديهيته . فقد يمكن القول بأن المتسلسلة متصلة بالمعنى الديديكندى عندما ، وعندما فقط ، يمكن تقسيم « جميع » حدود المتسلسلة بغير استثناء إلى فصلين ، بحيث يسبق « كل » الفصل الأول كل الفصل الثانى . وعندئذ مهما يكن التقسيم فإما أن يكون للفصل الأول حد أخير أو للفصل الثانى حد أول . ولا يجتمع هذان الأمران معاً أبداً . وهذا الحد الذى يأتى عند طرف واحد من الفصلين قد يستخدم حينئذ بطريقة ديديكند لتعريف المقطع . وفى المتسلسلات المنفصلة مثل متسلسلة الأعداد الصحيحة يوجد كل من حد أخير فى الفصل الأول وحد أول فى الفصل الثانى[1] . على حين أنه فى المتسلسلات الملتحمة كالمنطقات حيث لا يوجد اتصال فقد يحدث أحياناً (واو أنه ليس فى كل تقسيم محتمل) ألا يكون للفصل الأول حد أخير ، ولا يكون للفصل الأخير حد أول . والبديهية المذكورة سابقاً تستبعد كلا هاتين الحالتين . ولكنى لا أستطيع أن أرى أى أثر للوضوح الذاتى فى مثل هذه البديهية سواء أكانت مطبقة على الأعداد أو على المكان .

٢٦٧ – ولنترك جانباً فى الوقت الراهن المشكلة العامة للاتصال ، ولنرجع إلى تعريف ديديكند للأعداد اللامنطقة . وأول سؤال يخطر بالبال هو : بأى حق نفترض وجود مثل هذه الأعداد ؟ وما العلة فى افتراض ضرورة وجود موضع بين فصلين أحدهما إلى اليمين تماماً ، وليس لأحدهما حد أصغر ولا للآخر حد أكبر ؟ وليس هذا صحيحاً عن المتسلسلات بوجه عام ما دام كثير من المتسلسلات منفصلة . وهذا لا يتطلبه طبيعة الترتيب . ثم الاتصال كما رأينا ممكن على بعض المعانى بغيره . فلماذا ينبغى أن نفترض مثل هذا العدد أصلا ؟ وينبغى أن نذكر أن المشكلات الجبرية والهندسية والتى ترمى اللامنطقات إلى حلها . لا يجب أن يحسب لها حساب ههنا . والمعادلة س٢ – ٢ = ٠ يجب أن يكون لها جذر كما قيل ، لأن س كلما زادت من ٠ إلى ٢ ازدادت س٢ – ٢ . وتكون أولا سالبة ثم موجبة .

---

(١) إذا كانت المتسلسلة تشتمل على جزء صحيح هو متوالية ، فإنما يكون صحيحاً بوجه عام – ولكن لا بغير استثناء – أن الفصل الأول لابد أن يكون له حد أخير .

ولو تغيرت س باستمرار ، فكذلك تتغير $س^{٢} - ٢$ ، عندئذ يجب أن تأخذ $س^{٢} - ٢$ قيمة . في انتقالها من السلب إلى الإيجاب . وقد قيل أيضاً إن قطر المربع الذى طول ضلعه الواحد الصحيح له من الواضح طول مضبوط ومحدود هو س ، وأن هذا الطول يكون بحيث أن $س^{٢} - ٢ = ٠$ ولكن هذه الحجج كانت عاجزة عن بيان أن س هو عدد حقاً . ويمكن كذلك أن نعتبرها مبينة عجز الأعداد عن التعبير عن الجبر والهندسة . وترمى النظرية الراهنة إلى إثبات الوجود الحسابى للامنطقات ، وهى فى صورتها أفضل من النظريات السابقة ، ولكنها يبدو أن تطبيقها يقصر عن صورتها .

ولنفحص بالتفصيل تعريف $\sqrt{٢}$ بطريقة ديديكند . ومن الحقائق الغريبة أنه مع أن عدداً منطقاً يقع بين أى عددين مفردين منطقين ، فقد يمكن أن يعرف فصلان من الأعداد المنطقة بحيث لا يقع أى عدد منطق بينهما ، على الرغم من أن جميع حدود فصل واحد أعلى من جميع الفصل الآخر . ومن الواضح أن واحداً على الأقل من هذه الفصول يجب أن يشتمل على عدد لامتناه من الحدود ، إذ لو لم يكن الأمر كذلك لأمكننا إفراز اثنين من النوعين المتقابلين المتقاربين ، وندخل بينهما عدداً جديداً ، فيقع هذا العدد الواحد بين الفصلين . وهذا يضاد الفرض . ولكن حين يكون أحد الفصلين لامتناهياً فقد يمكن أن نرتب جميع الحدود أو بعضها فى متسلسلة من حدود تقترب باستمرار من الفصل الآخر دون أن تبلغه ، ودون أن يكون لها حد أخير . ولنفترض الآن أن فصلنا اللامتناهى معدود ، عندئذ نحصل على متسلسلة معدودة من الأعداد $ا_{ن}$ تنتمى كلها لأحد الفصلين ولكنها تقترب باستمرار من الفصل الآخر . وليكن ب عدداً ثابتاً من الفصل الثانى ، عندئذ يكون دائماً بين $ا_{ن}$ ، ب عدد آخر منطق ، ولكن هذا العدد يمكن اختياره من غير الألفات ، وليكن $ا_{ن+١}$. ولما كانت متسلسلة الألفات لامتناهية ، فليس من الضرورى أن نحصل بهذه الطريقة على أى عدد ليس منتمياً لمتسلسلة الألفات . وفى تعريف اللامنطقات متسلسلة الباءات لا متناهية كذلك . أضف إلى ذلك أنه إذا كانت الباءات معدودة أيضاً ، فأى عدد منطق بين $ا_{ن}$ ، $ب_{م}$ لقيم مناسبة لـ ن ، ك ، فإما أنه $ا_{ن+ل}$ أو $ب_{م+ك}$ أو أنه

يقع بين $\text{ا}_{\text{ه}+\text{ن}}$ وبين $\text{ا}_{\text{ه}+\text{ن}+1}$ ، أو بين $\text{ب}_{\text{م}+\text{ك}}$ وبين $\text{ب}_{\text{م}+\text{ك}+1}$. الواقع $\text{ا}_{\text{ه}+\text{ن}}$ تقع دائماً بين $\text{ا}_{\text{ه}}$ ، $\text{ب}_{\text{م}}$ ، وبخطوات متتابعة لا نحصل على أى حد يقع بين جميع الباءات وجميع الألفات . وعلى الرغم من ذلك فإن كلا الألفات والباءات متقاربة ، ولنفرض أن الألفات تتزايد على حين أن الباءات تتناقص ، عندئذ $\text{ب}_{\text{ه}} - \text{ا}_{\text{ه}}$ ، $\text{ب}_{\text{ه}} - \text{ا}_{\text{ه}+1}$ تتناقص باستمرار ، إذن $\text{ا}_{\text{ه}+1} - \text{ا}_{\text{ه}}$ وهى أصغر من أيهما أصغر من العدد المتناقص باستمرار . وعلاوة على ذلك يتناقص هذا العدد إلى غير حد إذ لو كان $\text{ب}_{\text{ه}} - \text{ا}_{\text{ه}}$ لها نهاية هى ء ، لوقع العدد $\text{ا}_{\text{ه}+2}$ أخيراً بين الفصلين . وبذلك تصبح $\text{ا}_{\text{ه}+1} - \text{ا}_{\text{ه}}$ أخيراً أقل من أى عدد معلوم وهكذا فإن الألفات والباءات متقاربة . ولما كان الفرق بينهما علاوة على ذلك يمكن أن يجعل أصغر من أى عدد معلوم فلهما نفس النهاية إن وجدت ولكن هذه النهاية لا يمكن أن تكون عدداً منطقاً ما دامت تقع بين جميع الألفات وجميع الباءات . ويظهر أن هذه هى الحجة لوجود اللامنطقات . مثال ذلك إذا كان .

$$\text{س} = \sqrt{2} + 1 \text{ ، } \text{س}^2 - 2\text{س} - 1 = 0$$

$$\therefore \text{س} = 2 + \frac{1}{\text{س}} = 2 + \frac{1}{2+}\frac{1}{\text{س}} \text{ و } \text{س} - 1 = 1 + \frac{1}{2+}\frac{1}{2+}\frac{1}{\text{س}} = \text{إلخ} \dots$$

والآيلات convergents المتتالية للكسر المتصل $1 + \frac{1}{2+}\frac{1}{2+}\frac{1}{2+}\dots$ هى بحيث أن جميع الآيلات الفردية أصغر من جميع الآيلات الزوجية ، فى الوقت الذى تتزايد فيه الآيلات الفردية باستمرار وتتناقص الزوجية باستمرار . وعلاوة على ذلك يتناقص باستمرار الفرق بين الآيلة الفردية والآيلة الزوجية التى تليها . وهكذا فإن كلا المتسلسلتين إذا كان لهما نهاية فلهما نفس النهاية ، وهذه النهاية تعرف بأنها $\sqrt{2}$

ولكن وجود نهاية فى هذه الحالة من الواضح أنه افتراض بحت ، فقد رأينا فى استهلال هذا الباب أن وجود نهاية يتطلب متسلسلة أكبر تكون النهاية جزءاً منها . فأن نبتدع النهاية بواسطة المتسلسلة التى علينا إيجاد نهايتها فهو إذن خطأ منطقى . هذا ومن الضرورى أن تتناقص المسافة من النهاية إلى ما لا نهاية له . ولكن ههنا مسافة الحدود المتعاقبة هى التى إنما يُعرف من أمرها أنها تتناقص بدون حد .

وفضلا عن ذلك جميع الألفات أصغر من ب‌ن . ومن ثم تفترق باستمرار شيئاً فشيئاً عن ب‌ن . ولكن مهما تكن ن . فلا يمكن أن تكون ب‌ن نهاية الألفات ، لأن ب‌ن+١ تقع بين ب‌ن وجميع الألفات . وهذا لا يمكن أن يثبت وجود النهاية بل يثبت فقط إنها إن وجدت . فلا تكون أحد الألفات أو الباءات ولا أى عدد آخر منطق . وهكذا لا يقوم برهان على وجود اللامنطقات . بل « عسى » فقط أن تكون أوهاماً fictions مناسبة لوصف علاقات الألفات والباءات .

٢٦٨ — ونظرية ڤايرشتراس عن اللامنطقات تشبه بعض الشيء نظرية ديديكند . فى نظرية ڤايرشتراس عندنا متسلسلة من الحدود ا١ ، ا٢ ..... ان ، بحيث أن ح ان لجميع قيم ن أصغر من عدد ما معلوم . وهذه الحالة نصادفها مثلا فى الكسر العشرى اللامتناهى . فالكسر ... ٣٫١٤١٥٩ مهما يكن عدد الحدود التى نأخذها يبقى أقل من ٣٫١٤١٦ . وفى هذه الطريقة ليست النهاية كما بين كانتور[١] ناشئة عن الجمع summation . بل يجب أن يفرض وجودها من قبل لكى يمكن أن تعرف ح∞١ بواسطتها . وهذا هو نفس ما وجدناه فى نظرية ديديكند : أن متسلسلات الأعداد المنطقة لا يمكن أن تثبت وجود الأعداد اللامنطقة على أنها نهاياتها ، ولكن إنما يمكن أن تثبت فقط . أنه « إذا » كانت هناك نهاية . فلابد أن تكون لا منطقة .

وهكذا فإن النظرية الحسابية عن اللامنطقات فى أى من الصورتين المذكورتين عرضة للاعتراضات الآتيه . (١) لا برهان نحصل عليه منها على وجود شىء آخر خلاف الأعداد المنطقة . اللهم إلا إذا سلمنا ببديهية عن الاتصال مختلفة عن تلك التى تحققها الأعداد المنطقة . وليس عندنا أى أساس حتى الآن لمثل هذه البديهية . (٢) وبفرض وجود اللامنطقات فهى إنما تخصص فقط ولا تعرف بمتسلسلة الأعداد المنطقة التى هى نهاياتها . فإذا لم نسلم بوجودها مستقلة تسليماً فالمتسلسلة المذكورة لا يمكن أن يعرف لها نهاية . وعلمنا بالعدد اللامنطق الذى هو نهاية . مفروض قبلا فى البرهان على أنه نهاية . وهكذا ومع أننا دون أن نرجع للهندسة . فأى عدد لامنطق معلوم يمكن أن « يخصص » بواسطة متسلسلة لا متناهية من الأعداد

(١) هذا وإلى أنقل نظرية ڤاير شتراوس مما أورده شتولز Mannichfultigkeitslehre p. 22
Stolz. Vorlesungen über allgemeine Arithmetik I

المنطقة ، إلا أنه لا برهان من الأعداد المنطقة وحدها يمكن إقامته على وجود أعدادٍ لامنطقة أصلا ، ويجب أن نبرهن على وجودها من مسلمة جديدة ومستقلة .

واعتراض آخر على النظرية المذكورة هو أنها تفترض أن المنطقات واللامنطقات تكون جزءاً من متسلسلة واحدة بعينها تتولد من علاقتى الأكبر والأصغر . وهذا يثير نفس النوع من الصعوبات التى رأينا أنها تنشأ – فى الجزء الثانى – من فكرة أن الأعداد الصحيحة أكبر من المنطقات أو أصغر منها ، أو أن بعض المنطقات أعداد صحاح . حقًّا المنطقات فى أساسها علاقات بين الأعداد الصحاح ، ولكن اللامنطقات ليست هى مثل هذه العلاقات . فإذا أعطينا متسلسلة لا متناهية من المنطقات فقد يمكن أن يوجد عددان صحيحان العلاقة بينهما عدد منطق تحد المتسلسلة ، أو يمكن ألا يوجد مثل هذا الزوج من العددين الصحيحين . فالشىء الذى فرضناه على أنه النهاية فى هذه الحالة الأخيرة لم يعد من نفس النوع كحدود المتسلسلة المفروض أنه يحدها . لأن كلا منها علاقة بين عددين صحيحين على حين أن النهاية ليست كذلك . ومن العسير أن نفترض فى مثل هذه الحدود أنها يمكن أن يكون لها علاقتا أكبر وأصغر . الواقع العلاقة المكونة للأكبر والأصغر التى تنشأ منها متسلسلة المنطقات يجب أن تعرف تعريفاً جديداً يناسب حالة اللامنطقيْن ، أو حالة منطق ولا منطق . وهذا التعريف القائل بأن اللامنطق أكبر من المنطق يستخدم حين يحد اللامنطقُ متسلسلةً تشتمل على حدود أكبر من المنطق المعلوم . ولكن المعلوم ههنا هو علاقة منطق معلوم بفصل من المنطقات ، وبالذات علاقة التبعية للقطعة المعرفة بالمتسلسلة التى نهايتها هى اللامنطق المعلوم . وفى حالة لامنطقين يعرف أحدهما بأنه أكبر من الآخر حين تشتمل متسلسلته المعرفة على حدود أكبر من أى حدود فى المتسلسلة المعرفة للآخر – وهو شرط يكافئ قولنا إن القطعة المناظرة لإحداهما تشتمل كجزء صحيح فيها على القطعة المناظرة للآخر . وهذه التعاريف تعرف علاقة مختلفة كل الاختلاف عن تباين منطقين ، وهى بالذات علاقة الاستغراق المنطقية . وهكذا لا يمكن للامنطقات أن تكون جزءاً من متسلسلة المنطقات ، بل لابد من وجود حدود جديدة تناظر المنطقات حتى يمكن أن تنشأ متسلسلة مفردة . ومثل هذه الحدود موجودة كما رأينا فى الباب السابق

فى القطع ، ولكن نظريتى ديديكند وڤاير شتراس تغفل البحث عنها .

٢٦٩ — ونظرية كانتور على الرغم من أنه لم يعبر عنها فاسفياً بالوضوح الواجب إلا أنها أدنى إلى التاويل الذى أذهب إليه . وترمى بوجه خاص إلى إثبات وجود النهايات . وهو يلاحظ[1] أن وجود النهاية فى نظريته قضية يمكن البرهنة عليها بدقة ، ويؤكد بشدة الخطأ المنطقى الداخل فى محاولة استنتاج وجود النهاية من المتسلسلة التى هى نهاية لها[2] . ويبدأ كانتور ببحث ما يسميه المتسلسلات الأساسية (وهى نفس ما سميته متواليات) المشمولة فى متسلسلات أكبر . وكل واحدة من هذه المتسلسلات إما أن تكون صاعدة بالكلية أو هابطة بالكلية . وتسمى اثنتان من مثل هذه المتسلسلات متماسكة (Zusammengehöring ، coherent) تحت الظروف الآتية :

(١) إذا كان كلاهما صاعداً . وكان دائماً بعد أى حد من أيهما حد من الآخر .

(٢) إذا كان كلاهما هابطاً . وكان دائماً قبل أى حد من أيهما حد من الآخر .

(٣) إذا كان أحدهما صاعداً والآخر هابطاً . وكان أحدهما يسبق بالكلية الآخر ، وكان « على الأكثر » حد واحد بين المتسلسلتين الأساسيتين .

وعلاقة التماسك متماثلة وذلك بمقتضى التعريف ؛ ويبين كانتور أنها متعدية . وفى المقالة التى استخلصنا منها الملاحظات المذكورة يبحث كانتور فى موضوعات أعم بكثير من تعريف اللامنطقات . ولكن الكلام الذى ذكرناه عن المتسلسلات المتماسكة سيعيننا على فهم نظرية اللامنطقات . وهذه النظرية مبسوطة على النحو الآتى فى كتاب Mannichfaltigkeitslehre (ص ٢٣ وما بعدها) .

تُعرَّف المتسلسلة الأساسية عن المنطقات بأنها متسلسلة معدودة بحيث إذا علم أى عدد وليكن ع ، فهناك على الأكثر عدد متناه من الحدود فى المتسلسلة تكون

(١) المرجع السابق ص ٢٤

(٢) توجد نظرية كانتور عن اللامنطقات فى المرجع السابق ص ٢٣ ، وفى Stolz. Vorlesungen uber allgemeine Arithmetik, I, 7. وسأبدأ باتباع عرض جاء فيما بعد يبدو لى أنه أوضح ، وموجود فى الفقرة ١٠ فى مقالة فى Math. Annalen. XLVI, and in Rivista di Matematica, V.

القيمة المطلقة للفروق بينها وبين الحدود التالية لها تزيد على ε . بعبارة أخرى إذا علم أى عدد ε مهما يكن صغيراً فأى حدين من المتسلسلة يأتيان معاً بعد حد معين فلهما فرق يقع بين + ε ، − ε . ومثل هذه المتسلسلة لابد أن تكون أحد أنواع ثلاثة : (١) أى عدد ε يذكر فالقيم المطلقة للحدود من حدمّا فما فوق ستكون كلها أصغر من ε مهما يكن : (٢) من حدمّا فما فوق جميع الحدود قد تكون أكبر من عدد موجب معين P ؛ (٣) من حدمّا فما فوق جميع الحدود قد تكون أصغر من عدد سالب معين − P . ويعرف العدد الحقيقى وليكن ب بالمتسلسلة الأساسية ، فيقال فى الحالة الأولى إنه الصفر . وفى الحالة الثانية إنه موجب . وفى الثالثة إنه سالب . ولتعريف الجمع وغير ذلك لهذه الأعداد الحقيقية الجديدة ، نلاحظ أنه إذا كان او ، اَو هى الحدود الواوية للمتسلسلتين الأساسيتين فالمتسلسلة التى حدها الواوى هى او + اَو ، أو او − اَو ، أو او × اَو فهى أيضاً متسلسلة أساسية . بينما إذا كان العدد الحقيقى المعرف بالمتسلسلة (او)[1] ليس الصفر ، فإن (اَو ÷ او) تعرف أيضاً متسلسلة أساسية . وإذا كان ب ، بَ هما العددان الحقيقيان المعرفان بالمتسلسلة (او) ، (اَو) ، فإن الأعداد الحقيقية المعرفة بـ (او + اَو) ، (او − اَو) ، (او × اَو) ، (اَو ÷ او) تعرف على أنها ب + بَ ، ب − بَ ، ب × بَ ، بَ ÷ ب بالتوالى . ومن هنا نشرع فى تعريف التساوى والأكبر والأصغر بين الأعداد الحقيقية . فنقول :

نعرف أن ب = بَ تعنى أن ب − بَ = ٠

، ب > بَ تعنى أن ب − بَ موجب .

، ب < بَ تعنى أن ب − بَ سالب

وهذه جميعاً حدود سبق تعريفها . ويلاحظ كانتور أيضاً أن أحد الأعداد فى هذه التعاريف قد يكون منطقاً . وربما يبرر ذلك صورياً بملاحظة أن المتسلسلة المعدودة والتى حدودها هى كلها نفس العدد المنطق فهى متسلسلة أساسية حسب التعريف . ومن ثم عندما نضع الفروق او − اَو والتى بها تعرف ب − بَ فقد نضع منطقا مّا ثابتاً ا فى موضع اَو لجميع قيم و . ولكن لا يترتب على ذلك

(١) الرمز (او) يدل على المتسلسلة كلها التى حدها الواوى هو او ، لا هذا الحد وحده .

أننا نستطيع تعريف ب — ا . وذلك لما يأتى : ليس ثمة شىء على الإطلاق فى التعريف المذكور عن الأعداد الحقيقية يبين أن ا هو العدد الحقيقى المعرف بمتسلسلة أساسية حدودها تساوى جميعاً ا . والسبب الوحيد الذى يجعل هذا بين الوضوح هو أن التعريف بالنهايات موجود لاشعورياً بحيث يجعلنا نظن أنه ما دام ا من الواضح أنه نهاية متسلسلة حدودها تساوى جميعاً ا . حينئذ لابد أن يكون ا العدد الحقيقى المعرف بمثل هذه المتسلسلة . ومع ذلك فما دام كانتور يصر — وهو على حق فيما أظن — على أن طريقته مستقلة عن النهايات التى بالعكس يجب أن تستنتج من هذه الطريقة (ص ٢٤ — ٢٥) فلا ينبغى أن نقف طويلا عند هذه الفكرة السابقة. بل الواقع هذه الفكرة السابقة — إذا لم أكن مخطئاً — باطلة . وليس فى التعاريف المذكورة من قبل ما يدل على تساوى أو لا تساوى العدد الحقيقى والعدد المنطق. بل هناك أسباب قوية جداً تجعلنا نفترض عكس ذلك . وكذلك لابد لنا أن نرفض القضية (ص ٢٤) القائلة بأنه إذا كان ب العدد الحقيقى المعرف بمتسلسلة أساسية ($ا_و$) . إذن

$$نها\ ا_و = ب$$

و = ::

ويعد كانتور نفسه فخوراً لافتراضه أن نظريته تجعل هذه القضية قابلة للبرهنة بالدقة . ولكن لا يوجد شىء كما رأينا يدل على أن المنطق يمكن طرحه من العدد الحقيقى . وعلى ذلك فالبرهان المزعوم باطل . أما الصحيح . والذى له جميع المزايا الرياضية المستمدة من النظرية المذكورة . فهو هذا : يرتبط بكل منطق ا عدد حقيقى وهو ذلك المعرف بالمتسلسلة الأساسية التى حدودها جميعاً تساوى ا . فإذا كان ب العدد الحقيقى المعرف بمتسلسلة أساسية ($ا_و$) . وكان $ب_و$ العدد الحقيقى المعرف بمتسلسلة أساسية حدودها جميعاً تساوى $ا_و$. إذن ($ب_و$) متسلسلة أساسية لأعداد حقيقية نهايتها ب . غير أننا لا نستطيع أن نستنتج من ذلك كما افترض كانتور (ص ٢٤) أن $ا_و$ موجودة . وهذا يصح فقط فى حالة ما إذا كان ($ا_و$) له نهاية منطقة . فالنهاية فى متسلسلة من المنطقات إما أنها غير موجودة . أو أنها منطقة. وعلى الحالين ليست عدداً حقيقياً . ولكن فى جميع الأحوال المتسلسلة الأساسية للمنطقات « تعرف » عدداً حقيقياً ليس متطابقاً البتة مع أى منطق .

٢٧٠ – ولنلخص الآن ما قيل عن نظرية كانتور : بعد أن أثبت كانتور أن متسلسلتين أساسيتين قد يكون لهما علاقة التماسك . وأن هذه العلاقة متماثلة متعدية ، بين كانتور استناداً إلى مبدأ التجريد (المفروض ضمناً) أن كلا هاتين المتسلسلتين لهما علاقة واحدة مـّا مع حد واحد ثالث لا غير . وهذا الحد إن قامت المتسلسلة على منطقات نعرفه بأنه العدد الحقيقى الذى تحدده كلتاهما . وعندئذ يمكننا تعريف قواعد العمليات فى الأعداد الحقيقية . وعلاقات التساوى والأكبر والأصغر بينها . غير أن مبدأ التجريد يلقى بنا فى غياهب الشك من أمر الأعداد الحقيقية ما هى فى الحقيقة ، باستثناء أمر واحد هو الذى يبدو يقينياً ، أنها لا تكون جزءاً من أية متسلسلة تشتمل على منطقات ، لأن المنطقات علاقات بين أعداد صحيحة ، وليست الأعداد الحقيقية كذلك . وعلاقة التكوين التى بمقتضاها تكون المنطقات متسلسلة إنما تعرف فقط بواسطة الأعداد الصحيحة التى تقوم بينها هذه العلاقات ، فلا يمكن أن تقوم نفس العلاقة بين عددين حقيقين أو بين عدد حقيقى وعدد منطق . وفى ظل هذا الشك عن حقيقة أمر الأعداد الحقيقية ما هى ، نجد أن قطع المنطقات بحسب تعريفها فى الباب السابق تحقق جميع المطالب التى أغفلها تعريف كانتور ، وكذلك المشتقة من مبدأ التجريد . وإذن فليس ثمة أساس منطقى للتمييز بين قطع المنطقات وبين الأعداد الحقيقية . وإذا وجب التمييز بينهما ، فلابد أن يكون ذلك بفضل حَدْسٍ مباشر مـّا ، أو بفضل بديهية جديدة تماماً مثل أن كل متسلسلات المنطقات فلابد أن يكون لها نهاية . وفى هذا القضاء المبرم على التقدم المضطرد للحساب والتحليل من المقدمات الخمس التى رآها بيانو كافية ، كما يناقض ذلك تماماً روح الذين اخترعوا النظرية الحسابية عن اللامنطقات . على العكس النظرية السابقة لا تحتاج إلى بديهية جديدة ، لأن المنطقات متى كانت موجودة فلا بد من وجود قطع لها . وتخلصنا هذه النظرية مما يبدو رياضياً من تعقيدات لا ضرورة لها ، لأن القطع إذا كانت ستحقق كل ما هو مطلوب من اللامنطقات ، فإن إدخال متسلسلة موازية جديدة لها بالضبط نفس الخواص الرياضية يبدو تزيداً لا نحتاج إليه .

جملة القول : اللامنطق هو بالفعل قطعة من المنطقات التى ليس لها نهاية ،

على حين أن العدد الحقيقى الذى يتطابق عادة مع العدد المنطق هو قطع لها نهاية منطقة . وهذا ينطبق مثلا على العدد الحقيقى المعرف بمتسلسلة أساسية من المنطقات جميع حدودها متساوية . وهذه هى النظرية التى رجحناها فى الباب السابق ، والتى رجعنا إليها مرة أخرى بعد بحث النظريات الشائعة عن اللامنطقات . وينطبق الجزء الأكبر منها على المتسلسلات الملتحمة بوجه عام . ولكن بعض استخدامات المتسلسلات الأساسية تفترض كما سنرى، فيما بعد إما القياس العددى للمسافات والامتدادات ، وإما أن تكون المتسلسلة الملتحمة المعدودة مشمولة فى متسلسلتنا بطريقة معينة[1] . ومع ذلك فالنظرية بأسرها تنطبق على أى متسلسلة ملتحمة نشأت عن متوالية ، كما تنشأ المنطقات عن الأعداد الصحيحة . والحاصل أننا لانتطلب فى الأعداد أية خاصية سوى أنها تكون متوالية .

---

(١) انظر الباب السادس والثلاثين .

الباب الخامس والثلاثون

أول تعريف للاتصال عند كانتور

٢٧١ – يعتبر الفلاسفة عادة أن فكرة الاتصال قاصرة عن التحليل . ولقد قالوا عنها الشيء الكثير بما فى ذلك قول هيجل المشهور : كل شيء منفصل فهو كذلك متصل والعكس بالعكس[١] . وهذه الملاحظة باعتبار أنها تمثيل لعادة هيجل فى الجمع بين الأضداد أصبحت مألوفة يكررها جميع أتباعه . حتى إذا رحنا نتقصى ما الذى قصدوه من معنى الاتصال والانفصال وجدنا أنهم قد لاذوا بصمت منفصل ومتصل . شيء واحد فقط هو الذى كان واضحاً . وهو أنه مهما يكن ما قصدوه فلم يكن أمراً يمت بصلة إلى الرياضيات أو إلى فلسفة المكان والزمان .

وقد اتفقنا مؤقتاً فى الباب الأخير من الجزء الثالث على تسمية المتسلسلة متصلة إذا كان فيها حد بين كل اثنين . وكان ذلك التعريف يرضى ليبنتز[٢] عادة ، وربما كان يظن كافياً بوجه عام حتى ظهور اكتشافات كانتور الثورية . وعلى الرغم من ذلك كان هناك سبب للظن قبل كانتور بإمكان رتبة أعلى من الاتصال . ذلك أنه منذ كشف المقادير غير القابلة للقياس incommensurables فى الهندسة – وهو كشف نجد البرهان عليه فى الكتاب العاشر عند أقليدس – كان من الراجح أن للمكان اتصالا من رتبة أعلى من رتبة الأعداد المنطقة التى لها على الرغم من ذلك نوع الاتصال المعرف فى الجزء الثالث . والنوع الذى ينتمى إلى الأعداد المنطقة والذى يقوم على وجود حد بين أى حدين قد اتفقنا على تسميته بالالتحام compactness . ولكى أتجنب الخلط لن أعود إلى وصف هذا النوع بالاتصال . أما ذلك النوع الآخر من الاتصال . والذى رأينا أنه ينتمى للمكان . فقد بحث

(١) Logic, Wallace's Translation, p. 188; Werke, V, p. 201.

(٢) *Phil Werke*, Gerhardt's ed, Vol. II, p. 515. But cf. Cassirer, *Leibniz's System*, Berlin, 1901, p. 183.

كما لاحظ كانتور [١] على أنه نوع من العقيدة الدينية . وكان خالياً من ذلك التحليل التصورى الواجب لفهمه . حقاً ذهبوا وبخاصة الفلاسفة منهم فى الغالب إلى بيان أن أى موضوع حاصل على الاتصال . فلم يكن قابلا للتحليل إلى عناصر قبولا صحيحاً . ثم بين كانتور أن هذا الرأى خاطئ بواسطة تعريف دقيق لذلك النوع من الاتصال الذى يجب أن ينتمى للمكان . هذا التعريف إذا وجب أن يكون شارحاً للمكان ، فلابد كما قال بحق [٢] أن يتم دون رجوع إلى المكان . وبناء على ذلك لا نجد فى تعريفه الأخير إلا أفكاراً ترتيبية ذات نوع عام يمكن أن نضرب لها أمثلة كاملة فى الحساب . أمَّا البرهان على أن الفكرة المعرفة كذلك هى بالضبط نوع الاتصال التابع للمكان . فيجب أن نؤجله إلى الجزء السادس . وقد أعطى كانتور تعريفه فى صورتين : أولهما ليس ترتيبياً بحتاً . ولكنه يتطلب كذلك إما العدد أو المقدار . وأود فى هذا الباب أن أترجم هذا التعريف الأقدم إلى لغة بسيطة وغير فنية بقدر الإمكان . ثم أبين كيف أن المتسلسلات المتصلة بهذا المعنى تحصل فى الحساب . وعلى العموم فى نظرية أى متوالية كانت . أما التعريف المتأخر فسنبحث عن أمره فى الباب التالى .

٢٧٢ ـ لكى تكون متسلسلة متصلة فلابد أن تمتاز بخاصتين : أن تكون كاملة perfect وأن تكون متماسكة cohesive (Zusammenhangend, bien enchainée) [٣] ولكلا هذين الحدين معنى فنى يحتاج إلى شرح عظيم . وسأبدأ بالاصطلاح الثانى .

(١) بقول عام تكون المتسلسلة متماسكة . أو يكون لها تماسك إذا لم تشتمل على فجوات gaps متناهية . وإليك التعريف الدقيق كما وضعه كانتور : « نسمى ط مجموعة متماسكة من النقط . إذا كان هناك دائماً بين ط . ط َ من ط . ولعدد ϵ معطى من قبل وبالغ الصغر بحسب ما نشاء . وبعدة طرق . عدد متناه من النقط $ط_{١}$ ، $ط_{٢}$ . . . $ط_{و}$ وينتمى ا ط . بحيث تكون المسافات $ط ط_{١}$. $ط_{١} ط_{٢}$. $ط_{٢} ط_{٣}$ .... $ط_{و}$ ط َ هى كلها أصغر من ϵ » [٤] . وهذا الشرط له كما سترى

(١) Acta Math. II, p. 403

(٢) Mannichfaltigkeitslehre, p. 28.

(٣) Acta Math. II, p. 405; 406;

(٤) Acta Math. II, p. 405, 406; Mannichfaltigkeitslehre, p. 31.

عبارة « وبعدة طرق » يظهر أنها زائدة . وقد حذفها فيفانتى . انظر :

Formulaire de Mathématique, Vol. I, VI, * No. 22.

صلة جوهرية بالمسافة . ومن الضرورى أن تشتمل المجموعة المذكورة على أعداد ، لا أن ء يجب أن يكون عدداً . فكل ما هو لازم هو أن تكون المجموعة متسلسلة فيها مسافات تحقق بديهية أرشميدس وليس لها حد أصغر ، وأن يكون ء مسافة تحكمية من النوع الذى تقدمه المتسلسلة . فإذا كانت المتسلسلة هى المجال كله لعلاقة مَّا لا متماثلة متعدية ، أو إذا كانت كافة الحدود التى لها علاقة معينة لا متماثلة متعدية مع حد معلوم ، فقد يمكن أن نستبدل الامتداد بالمسافة . وحتى إذا كانت المتسلسلة إنما هى جزء فقط من مثل هذه المتسلسلة ، فيمكننا استبدال الامتداد فى المتسلسلة التامة التى تكوِّن متسلسلتنا جزءاً منها . غير أننا لكى نعطى أى معنى للتماسك فلابد أن يكون عندنا شىء يقاس عددياً . ما مبلغ ضرورة هذا الشرط ، وماذا يمكن عمله بغيره ، هذا ما سأبينه فيما بعد . وبواسطة هذا الشرط تصبح مناقشتنا عن الكمية والقياس التى قمنا بها فى الجزء الثالث داخلة فى مناقشة الاتصال .

وإذا لم تحقق المسافات أو الامتدادات فى متسلسلاتنا بديهية أرشميدس ، فمن بينها متسلسلات تعجز عن القياس العددى المتناهى فى صيغة بعض متسلسلات أخرى من بينها. وفى هذه الحالة لا يوجد تجانس analogy من النوع المطلوب لا مع الأعداد المنطقة ولا مع الأعداد الحقيقية ، ولا تكون المتسلسلة بالضرورة متماسكة . وليكن ء ، د مسافتين ، ولنفرض أنهما لأى عدد متناه ن ، ن ء أصغر من د . فى هذه الحالة إذا كانت ء المسافة ء ، وكانت د المسافة ط طَ ، فمن الواضح أن شرط التماسك لا يمكن أن يتحقق . ومثل هذه الحالات تقع بالفعل ، ويمكن أن تنشأ ــ مما يبدو متناقضاً ــ بمجرد استكمال الحدود فى متسلسلة متماسكة معينة . مثال ذلك أن متسلسلة قطع المنطقات متماسكة ، وحين يكون لهذه القطع نهايات منطقة ، فلا تكون النهايات داخلة فيها . ولتضف الآن إلى المتسلسلة ما يمكن أن نسميه بالقطاعات المكمَّلة completed ، أى القطع التى لها نهايات منطقة مأخوذة مع نهايتها . فهذه حدودة جديد تكوِّن جزءاً من نفس المتسلسلة ما دام لها علاقة الكل والجزء مع الحدود السابقة . فالفرق الآن بين القطعة وبين القطعة المكملة المناظرة لها يتألف من منطق مفرد ، على حين أن جميع الفروق الأخرى فى المتسلسلة تتألف من عدد لامتناه من المنطقات . وبذلك تبطل بديهية أرشميدس ،

ولا تكون المتسلسلة الجديدة متماسكة .

أما الشرط القائل بأن المسافات فى المتسلسلات ليس لها حد أصغر فتحققه الأعداد الحقيقية أو المنطقة . ومن الضرورى إذا وجب أن يمتد التماسك ليشمل المتسلسلات غير العددية . أن تكون هناك. حين تُختار أى وحدة من المسافة ، مسافات قياسها العددى أصغر من ε . حيث ε أى عدد منطق . لأنه إذا وجدت مسافة صغرى فلا يمكن أن نجعل مسافاتنا ط ط ١ . ط ١ ط ٢ .... أصغر من هذه المسافة الصغرى ، مما يناقض تعريف التماسك . هذا ولا يجب فقط أن يوجد نهاية صغرى للمسافات عموماً . بل يجب ألا يوجد نهاية صغرى للمسافات من أى حد معلوم، ومن ثمّ كل متسلسلة متماسكة cohesive يجب أن تكون ملتحمة compact . أى يجب أن يكون لها حد بين أى حدين .

ومع ذلك لا ينبغى أن نفترض أن كل متسلسلة ملتحمة فهى متماسكة . انظر مثلا المتسلسلة المكونة من ٠ . ومن ٢ − م/ن . حيث م ، ن أى عددين صحيحين بحيث يكون م، ن أصغر من ن . فههنا حد بين أى حدين. ولكن المسافة من ٠ لا يمكن أن تكون أقل من ١ . وهكذا ولو أن المتسلسلة ملتحمة إلا أنها ليست متماسكة . وهذه المتسلسلة مع ذلك ليست تامة. من حيث إنها جزء فقط من متسلسلة المنطقات التى بواسطتها تقاس مسافاتها . وفى المتسلسلة التامة تختلف الشروط بعض الشئ . ولابد لنا من التمييز بين حالتين بحسب وجود مسافات أو عدم وجود مسافات . (ا) فإذا كانت هناك مسافات ، والمسافات المتساوية لا تناظر الامتدادات المتساوية . فقد يحدث أنه على الرغم من التحام المتسلسلة . فإن المسافات من حد مّا لا تصبح أبداً أصغر من مسافة ما متناهية . وهذه الحالة قد تقدمها المقادير إذا سلمنا برأى مينونج من أن مسافة أى مقدار متناه من الصغر فهى دائماً لا متناهية (انظر المرجع السابق ص ٨٤) . وتقدمها الأعداد إذا كنا نقيس المسافات (وهناك أسباب كثيرة لذلك) باوغاريتم م/ن . وهكذا فى هذه الحالة وبالنسبة للمسافات ليست المتسلسلة متماسكة ولو أنها تامة وملتحمة . (ب) وإذا لم تكن هناك مسافات بل امتدادات فقط ، فعندئذ مع فرض بديهية أرشميدس أى امتداد سيكون أصغر من ε لقيمة مناسبة لـ ε . ومن ثمّ إذا قسمنا الامتداد

إلى ى من الأجزاء . فجزء على الأقل منها سيكون أصغر من ε . ولكن ليست هناك طريقة لإثبات أنها كلها يمكن أن تجعل أصغر من ε . اللهم إلا إذا افترضنا بديهية الخطية (أن أى امتداد وليكن ى فيمكن قسمته إلى ى من الأجزاء المتساوية) أو إذا افترضنا بديهية أعقد ولكنها أعم . وتنص على أن الامتداد د يمكن قسمته إلى ن من الأجزاء كل منها أكبر من $\frac{د}{ن+١}$ وأصغر من $\frac{د}{ن-١}$ مهما تكن قيمة العدد الصحيح ن . وبهذه البديهية وبديهية أرشميدس . لابد أن تكون المتسلسلة الملتحمة التامة complete متماسكة . ولكن هاتين البديهتين معاً تجعلان التام فضلا زائداً والالتحام تكراراً . وهكذا نرى أن التماسك يكاد يكون فى جميع الأحوال شرطاً متميزاً عن الالتحام . فالالتحام تسلسلى بحت . على حين أن التماسك له صلة جوهرية بالأعداد أو بشروط القياس العددى . والتماسك يستلزم الالتحام ، ولكن الالتحام لا يستلزم البتة التماسك . فيما عدا الحالة الوحيدة للمتسلسلات التامة لمتسلسلة اللامنطقات أو الأعداد الحقيقية .

٢٧٣ — (٢) أما شرح المقصود من المتسلسلة الكاملة perfect فأمر أصعب . تكون المتسلسلة كاملة حين تتوافق مع أول مشتقاتها [١]. ولشرح هذا التعريف لابد من فحص فكرة المشتقات derivatives عن المتسلسلة[٢]. وهذا يتطلب منا شرح « نقطة النهاية » a limiting-point فى المتسلسلة . وبوجه عام حدود المتسلسلة على نوعين . تلك التى يسميها كانتور بالنقط « المنعزلة » isolated . والتى يسميها « نقط النهاية » . والمتسلسلة المتناهية لها فقط نقط منعزلة . والمتسلسلة اللامتناهية فيجب أن تعرّف على الأقل نقطة نهاية واحدة . ولو أن هذه النقطة ليس من الضرورى أن تتبع المتسلسلة . ويعرّف كانتور نقطة النهاية بأنها حد يكون بحيث أنه فى أى فترة تشتمل عليه . فهناك عدد لا نهاية له من الحدود فى المتسلسلة . (المرجع السابق ٣٤٣) . وهو يعطى التعريف فى صيغة نقط على خط ، دون أن يكون للتعريف صلة جوهرية بالمكان . وربما كانت نقطة النهاية حداً فى المتسلسلة الأصلية . وربما لم تكن . ويسمى اجتماع assemblage جميع نقط

---

(١) Acta Math. II, p. 405.

(٢) المرجع السابق ص ٣٤١ — ٣٤٤ .

النهاية المشتقة الأولى للمتسلسلة . ويسمى المشتقة الأولى من المشتقة الأولى بالمشتقة الثانية . وهكذا . ويعطى بيانو تعريف المشتقة الأولى لفصل الأعداد الحقيقية كما يأتى : ليكن ى فصل أعداد حقيقية . وليكن س عدداً حقيقياً (وقد يكون أحد الفصل ى وقد لا يكون) بحيث تكون النهاية الدنيا للقيم المطلقة لفروق س عن حدود ى التى هى غير س صفراً . عندئذ يكون فصل حدود س المحقق لهذا الشرط المشتق الأول من ى[1]. وهذا مطابق فرضاً لتعريف كانتور . إلا أنه يبرز بصراحة أكثر صلة المشتق بالنهايات . فالمتسلسلة إذن تكون كاملة حين تتألف بالضبط من نفس الحدود كمشتقاتها الأولى . أى حين تكون جميع نقطها نقط نهايات . وتنتمى جميع نقط النهايات إليها .

٢٧٤ ــ أما بالنسبة للمسألة الأخيرة وهى أن جميع نقط النهايات فى المتسلسلة يجب أن تنتمى إليها . فلا مناص لنا من بعض الشرح . خذ مثلا متساسلة الأعداد المنطقة . فكل عدد منطق فهو نهاية متسلسلة أعداد منطقة مـّا . وحينئذ تكون المنطقات مشمولة فى مشتقتها الأولى . ولكننا قد اتفقنا فى الباب السابق بالنسبة لمتسلسلات المنطقات التى ليس لها نهاية مُنطقة . على أنه ليس لها نهاية على الإطلاق . وبناء على ذلك جميع متسلسلات المنطقات التى لها نهاية فنهايتها منطقة . فالمنطقات إذن بمقتضى نص التعريف لابد أن تكون متسلسلة كاملة perfect . ولكن ليس الأمر كذلك . فقد رأينا عند الكلام على اللامنطقات أن كانتور يعتقد ــ وهو اعتقاد اضطررنا إلى اعتباره باطلا ــ أن كل متسلسلة تحقق شروطاً معينة يمكن تسميتها شروط التقارب فلا بد أن يكون لها نهاية . ولذلك يعتبر متسلسلات المنطقات التى ليس لها نهاية منطقة أن لها نهاية لا منطقة . فهى لذلك لها نهاية لا تنتمى لمتسلسلة المنطقات . وإذن فمتسلسلة المنطقات لا تشتمل على جميع حدود مشتقتها الأولى . الواقع المشتق الأول من الأعداد المنطقة من المتفق أنه هو الأعداد الحقيقية . ولكن حين نعتبر الأعداد الحقيقية كقطع من المنطقات يتعذر اتخاذ هذه الوجهة من النظر . وحين ننكر النظرية الوجودية

(١) Formulaire, Vol. II, No. 3 (1899) § 71. 10 and 40.

للنهايات فيجب تعديل تعريف كانتور للكمال perfection [1] . هذا التعديل هو الذى سنقوم بالنظر فيه الآن .

نقول : تكون المتسلسلة كاملة حين تكون جميع نقطها نقط نهايات ، وحين أيضاً تكون أى متسلسلة أفرزت من المتسلسلة الأولى من النوع الذى يعتبر عادة بأنه يعرّف نهاية . فلهذه المتسلسلة بالفعل نهاية تنتمى للمتسلسلة الأولى . ولكى نجعل هذه العبارة دقيقة لابد أن ننظر فى أمر الشروط التى تعتبر معرّفة للنهاية . وهذه الشروط فى حالة المتسلسلة المعدودة بسيطة وقد شرحناها من قبل ، ويُعبر عنها بما يأتى : إذا فرضنا أى مسافة ε مهما تكن صغيرة ، كانت جميع حدود المتسلسلة بعد حد معين ليكن الحد الميمى بحيث أى اثنين منها لهما فرقٌ قيمته المطلقة أصغر من ε . هذه العبارة كما سنرى تستدعى إما العدد أو الكمية ، أى أنها ليست ترتيبية بحتة . ومن الحقائق الغريبة أنه ولو أن الشرط المفروض لوجود النهاية لا يمكن بطريقتنا الراهنة التعبير عنه بصيغة ترتيبية بحتة . وسأميز فى متسلسلة كانتور الأساسية الخاصة بالمتسلسلة الملتحمة بين المتواليات والمتراجعات regressions ، بحسب ما يكون للحدود المتقدمة دائماً العلاقة ف مع الحدود المتأخرة ، أو دائماً العلاقة فَ (حيث ف هى العلاقة المولدة للمتسلسلة الملتحمة التى تشتمل على المتواليات والمتراجعات المذكورة) . هذا والمفروض كذلك أن هذه المتسلسلة الملتحمة تامة . عندئذ يكون الحد س نهاية متوالية . إذا كان لكل حد فى المتوالية العلاقة ف مع س ، وكل حد له العلاقة ف مع س له أيضاً هذه العلاقة مع حدٍّ ما من المتوالية . هذا التعريف كما سنرى ترتيبى بحت . وينطبق تعريف شبيه به على المتراجعة .

ولنشرع بعد ذلك فى بحث الشروط العادية لوجود نهاية لمتسلسلة غير معدودة . وحين نقبل على بحث المتسلسلات غير المعدودة . سنجد من غير المناسب أن تتقيد بالمتسلسلات المعدودة . ولذلك يحسن النظر فى أمر المتسلسلات الأخرى حالا . وهنا بالطبع إذا كانت أى متسلسة معدودة متضمنة فى متسلسلتنا الأكبر تحقق

---

(١) قد أحسن كوتيراه مناقشة هذه النقطة فى مجلة *Revue de Mét. et de Morale*, March, 1900, p. 167.

شروط النهاية ، فسيكون هناك تعريف مناظر لنقطة النهاية فى متسلسلتنا الأكبر . ويمكن بالضبط أن تعرف النهاية العليا أو الدنيا لكل متسلسلتنا الأكبر أو جزئها إن وجدت مثل هذه المتسلسلة كما هو الحال فى المتوالية أو المتراجعة . ولكن لا يمكن وضع شروط عامة لوجود نهاية إلا بالرجوع إلى المتسلسلة المعدودة المتضمنة فى متسلسلتنا الأكبر . ومن الملاحظ أن تعريف كانتور لنقطة النهاية يفترض وجود مثل هذه النقطة ، ولا يمكن أن ينقلب إلى تعريف للشروط التى توجد فيها مثل هذه النقط . وهذا يوضح الأهمية العظمى لمتسلسلة كانتور الأساسية .

وستلقى مع ذلك طريقة القطع بعض الضوء على هذه المسألة . فقد رأينا فى الباب الثالث والثلاثين أن أى فصل من الحدود فى متسلسلة فإنه يعرف قطعة . وأن هذه القطعة ربما أمكن تعريفها بحد واحد . وربما لم يمكن فى بعض الأحيان . فإن أمكن تعريفها كذلك كان هذا الحد النهاية العليا للقطعة ، وإذا لم يكن هذا الحد منتمياً للفصل الذى به عرفت القطعة ، كان هذا الحد أيضاً النهاية العليا لذلك الفصل . ولكن عندما لا يكون للقطعة نهاية عليا ، فالفصل الذى عرفت به القطعة لا يكون له أيضاً نهاية عليا . ومع ذلك ففى جميع الأحوال — وهذا أحد الفضائل الهامة للقطع — القطعة المعرفة بفصل لامتناه ليس له نهاية عليا فهو النهاية العليا للقطع المعرّفة بأعضاء الفصل المتعددة . وبذلك سواء أكان للفصل نهاية عليا أم لم يكن ، فإن القطع التى تعرفها حدوده المتعددة لها دائماً نهاية عليا — بشرط أن يكون للمتسلسلة الملتحمة المتضمنة للفصل حدود تأتى بعد جميع حدود الفصل .

نستطيع الآن . دون افتراض وجود نهايات فى الأحوال التى لا يمكن البرهنة على وجودها ، أن نبين معنى المتسلسلة المشتملة على مشتقتها الأولى . حين يكون أى فصل من الحدود متضمناً فى متسلسلة ملتحمة . فالشروط التى يقال عادة إنها تضمن وجود نهاية عليا للفصل . مع أنها لا تضمن ذلك بالفعل . إلا أنها تضمن فعلا وجود نهاية عليا لفصل القطع المعرفة بواسطة أعضاء الفصل المتعددة . أما فيما يختص بالنهايات الدنيا فالقضية عينها تصح عن ذلك الذى سميناه بالقطع العليا . وبناء على ذلك يمكن أن نضع هذا التعريف : يكون الفصل ى من الحدود المكونة لكل المتسلسلة أو جزئها كاملا . حين يكون كل حد من حدود ى النهاية العليا أو

الدنيا لفصل مَّا متضمن فى ى. وحين يكون إذا كان ف أى فصل متضمن فى ى، وكان للقطع الدنيا المعرفة بأعضاء ف المتعددة نهاية عليا أو كان للقطع العليا نهاية دنيا كانت قطعة النهاية هذه إحدى تلك القطع التى يمكن تعريفها بحد واحد من ى؛ أى لها حد من ى كنهاية عليا أو دنيا لها على التوالى . وينبغى أن نعترف بأن هذا التعريف أعقد من تعريف كانتور . غير أنه يخلو من الفرض الذى لا مبرر له وهو وجود النهايات .

ويمكن أن نعيد تعريف الكمال فى لغة ربما كانت أقل صعوبة فنقول : إذا علمت أى متسلسلة وأى فصل من الحدود ى متضمن فى هذه المتسلسلة ، فهناك قطعة عليا وقطعة دنيا يناظران كل حد فى ى . وأى مجموعة لا متناهية من الحدود ف نفرزها من ى . فهناك شروط معينة يقال عادة إنها تضمن أن يكون للفصل ف نهاية عليا من المسلم به أنها قد لا تنتمى ا ى ولا للمتسلسلة التى تكون ى مضمنة فيها . أما ما تضمنه هذه الشروط فهو أن فصل القطع الدنيا المناظر ا ف له نهاية عليا . فإذا كانت المتسلسلة كاملة . كان ا ف نهاية عليا كلما كان لفصل القطع المناظر نهاية . وهذه النهاية العليا ا ف هى حد فى ى . ويتطلب هذا التعريف للكمال أن يصح ذلك بالسوية على النهايات العليا والدنيا ، وعلى أى فصل ف متضمن فى ى .

٢٧٥ ــ ولما كانت مسألة وجود النهايات قد أوجبت التعقيد المذكور ، وكانت على شىء من الأهمية الفلسفية فسأعيد ذكر الحجج التى تقال ضد افتراض وجود النهايات فى فصل المتسلسلة التى تنتمى إليها الأعداد المنطقة . حيثما تكون متسلسلة غير كاملة . على حين يكون مشتقها الأولى كاملة . فهاهنا تكون أول مشتقتها الأولى متقدمة منطقياً على تكوينها نفسها . بمعنى آخر بافتراض وجود المتسلسلة الكاملة أولا إنما أمكن أن نبين أنها مشتقة من المتسلسلة غير الكاملة . وقد رأينا فيما قبل أن هذه هى حال الأعداد اللامنطقة الشخصية . ومن السهل أن نبين أن هذا المبدأ عام . فحيثما تشتمل المشتقة على حد لا ينتمى إلى المتسلسلة الأصلية . فذلك الحد هو نهاية متسلسلة معدودة تكوّن جزءاً متكاملا من المتسلسلة الأولى . فإذا كانت هذه المتسلسلة ذات النهاية لها الحد العام ان ، إذن ــ وسنضع

التعريف فى عبارة لا تنطبق فقط على متسلسلة الأعداد ــ هناك دائماً عدد مُعرَّف م لأى مسافة متخصصة ، مهما تكن صغيرة بحيث إذا كان ں أكبر من م فالمسافة بين اں+ں وبين اں أصغر من ء مهما يكن العدد الصحيح الموجب ں . ومن هذا نستنتج أن المتسلسلة (اں) لها نهاية ، وأن هذه النهاية فى حالات كثيرة لا يمكن أن تنتمى إلى المتسلسلة التى أفرزت منها (اں) . ولكن الاستنتاج بوجود نهاية استنتاجٌ مزعزع ، قد يؤيد إما بمعرفة سابقة بالحد الذى هو نهاية ، وإمّا ببديهية مّا تستوجب وجود مثل هذا الحد . وحين يُعرف الحد الذى هو النهاية بطريقة أخرى مستقلة فقد يسهل تبين أنه النهاية ، ولكن حين لا يُعرف فلا يمكن أصلا إثبات وجوده اللهم إلا إذا أدخلنا بديهية مّا عن الاتصال . وقد أدخل ديديكند مثل هذه البديهية ، غير أننا رأينا أنها غير مرضية . ومبدأ التجريد الذى يدل على أن المتسلسلتين المتماسكتين لهما شىء مّا مشترك فتحققه القطع تماماً . وفى بعض الحالات التى من بينها حالة المنطقات يظهر أن العلاقة المكونة للمتسلسلات غير الكاملة لا يمكن أن تقوم بين أى حدين لا ينتميان إلى هذه المتسلسلة بحيث يستحيل أصلا وجود نهايات لا تنتمى إلى المتسلسلة . لأن النهاية لابد أن يكون لها وضع معين فى متسلسلة تكون المتسلسلة التى هى نهاية لها جزءاً منها ، وهذا يتطلب علاقة مكوِّنة مّا لابد أن تكون قادرة على تكوين النهاية وكذلك الحدود المحدودة بالنهاية . الواقع لا يمكن لمتسلسلة تامة مستقلة كالمنطقات أن يكون لها نقط نهايات لا تنتمى إليها . لأنه إذا كانت ع العلاقة المكونة ، وكان لحدين ا ، ب العلاقة ع ، فأى حد ثالث حـ له هذه العلاقة أو عكسها مع ا أو ب وإذن يكون له هذه العلاقة معهما معاً ، فإنه ينتمى لعين المتسلسلة مثل ا ، ب . ولكن النهاية إن وجدت فيجب أن يكون لها العلاقة المكونة مع الحدود التى تحدها ، وبذلك يجب أن تنتمى للمتسلسلة التامة التى تنتمى إليها الحدود. يترتب على ذلك أن أى متسلسلة لها بالفعل نقط نهايات لا تنتمى إليها ، فليست إلا جزءاً فقط من متسلسلة تامة ما . والمتسلسلة التامة التى ليست كاملة فهى متسلسلة لا توجد فيها ألبتة النهايات المُعرَّفة بالطريقة العادية بشرط ألا تنتمى النهايات للمتسلسلة . يترتب على ذلك أنه فى أى متسلسلة تامة إما أن بعض النهايات المعرفة لا توجد البتة ، وإما أن المتسلسلة تشتمل على مشتقتها الأولى .

ولكى نجعل التحكم فى افتراض وجود النهايات أوضح فلنحاول وضع بديهية اتصال أقل عرضة للنقد من بديهية ديديكند . وسنرى أنه يمكن إنكارها دون أى خسارة .

حين يقل شيئاً فشيئاً باستمرار تخالف عدد من أوضاع متسلسلة من المعلوم أنها كلها فى جانب واحد من وضع معلوم ، فلابد من وجود (وهكذا تجرى بديهيتنا) وضع مَّا تتقارب إليه إلى ما لا نهاية له، بحيث لا يمكن أن تتخصص أى مسافة بأنها تبلغ من الصغر حداً لن تكون المسافات الأخرى أقرب من هذا الوضع بهذه المسافة . فإذا سلمنا بهذه البديهية ترتب على ذلك أن جميع المتسلسلات غير الكاملة التى تكون مشتقتها الأولى كاملة تفترض فى أساسها هذه المشتقات الأولى ولابد أن تعتبر منتخبات منها . ولنفحص نتائج إنكار بديهيتنا فى حالة متسلسلة الأعداد . وفى هذه الحالة ربما نفترض على سبيل المجازفة أن الوضع التالى لجميع الحدود ا ن، ولكنه لا ينتمى إليها ليكن (مثلا) و ، حيث و — ا ن أكبر من ء لقيمة مناسبة لـ ء مهما يكن ن . ولكن إذا كانت متسلسلتنا ملتحمة ، فهناك حد بين و، و — ء ، وليكن و َ. وبذلك يكون و َ أقل من و — ا ن، مهما تكن قيمة ن . وبذلك يكون و أقرب إلى جميع الألفات من قرب و منها، مما يخالف الفرض . ولكن الإنكار المذكور لم يكن مباشراً ، والواقع من أنه كان يبدو صحيحاً يوضح المغالطات التى يصعب تجنبها فى هذا الموضوع . وهذه هى البديهية : هناك حد تقترب منه الألفات حسب ما نشاء . وهذا هو الإنكار : هناك حد أقرب ما يكون إلى الألفات ولكنه على مسافة متناهية . وكان ينبغى أن يكون الإنكار كالآتى : ليس هناك حد تقترب منه الألفات حسب ما نشاء . بعبارة أخرى مهما يكن الحد الذى نخصصه ، وليكن و ، فهناك مسافة متناهية مَّا ء بحيث يكون و — ا ن أكبر من ء مهما يكن ا ن . وهذا صحيح فى حالة متسلسلة الأعداد المنطقة التى ليس لها نهاية منطقة . وفى هذه الحالة ليس هناك حد أقرب إلى الألفات ، ولكن على مسافة متناهية ومهما يكن الحد الذى نخصصه وراء الألفات (فيما عدا حيث يكون للمتسلسلة نهاية منطقة) فلا حد من الألفات يقترب أقرب إلى هذا الحد من مسافة مَّا متناهية . فكل حد وراء الألفات أبعد من مسافة مَّا متناهية عنها كلها ، ولكن ليس هناك مسافة متناهية كل حد وراء الألفات

يتجاوزها . وإدخال اللامنطقات يدخل التماثل فى هذه الحالة الغريبة من الأمور بحيث يكون هناك حد تقترب منه الألفات إلى ما لا نهاية له ، وكذلك متسلسلة من الحدود تقترب إلى ما لا نهاية له من الألفات . وحين لا نسمح باللامنطقات ، إذا كان عندنا حد و‌ه بعد جميع الألفات ، ومسافة صغيرة ء ، إذن إذا تخصصت ء ، أمكن انتخاب ن بحيث يكون و‌ه — ا‌ن أصغر من ء مهما يكن ن . ولكن إذا تخصصت و‌ه ، أمكن دائماً إيجاد المسافة ء (فيما عدا إذا كانت النهاية منطقة) بحيث يكون و‌ه — ا‌ن أكبر من ء مهما يكن ن. وهذه الحالة ولو أنها غريبة إلا أنها غير متناقضة . والتسليم باللامنطقات باعتبار أنها تقابل القطع يكون بذلك غير ضرورى منطقياً . ولما كان هذا التسليم أيضاً زائداً عن الحاجة رياضياً ، وقاضياً القضاء المبرم على نظرية المنطقات ، فليس ثمة سبب لصالحها ، بل هناك أسباب قوية لرفضها . خلاصة القول أى بديهية تهدف إلى بيان وجود النهايات فى الأحوال التى لا يمكن بغير ذلك تبيين وجودها فلابد من رفضها ، و يجب تعديل تعريف كانتور عن الكمال بحسب ما ذكرناه . وسنعتبر هذه النتيجة فى المستقبل كأنها مقررة .

بعد تحليل تعريف كانتور الأقدم للاتصال ، سأشرع فى فحص تعريفه الترتيبى الذى وضعه فيما بعد ، وأبحث فى تطبيق أجزائه المتعددة على متسلسلات أعم من متسلسلات الأعداد ، مبيناً إن أمكن النقط الصحيحة التى تحتاج إليها هذه الأجزاء المتعددة .

الباب السادس والثلاثون

الاتصال الترتيبي [١]

٢٧٦ – تعريف الاتصال الذى بحثناه فى الباب السابق لم يكن كما رأينا ترتيبيا بحتاً ، إذ تطلب على الأقل فى نقطتين شيئاً من الصلة إما بالأعداد وإمَّا بالمقادير التى تقاس عددياً . وعلى الرغم من ذلك يبدو الاتصال كأنه فكرة ترتيبية بحتة ، وهذا ما أدى كانتور إلى وضع تعريف يخلو من جميع العناصر الغريبة عن الترتيب [٢] وسأبحث الآن هذا التعريف كما سأبحث غيره مما عسى أن يوحى به الكلام . وسنجد أنه ما دامت كلُّ صلة بالعدد والكمية قد استُبعدت فهناك نظريات على جانب عظيم من الأهمية ، وبخاصة بالنسبة للمتسلسلات الأساسية ، تظل غير قابلة للبرهان حتى مع وجود أى تعريف ترتيبي ما عدا تعريف كانتور ، وهى فى أكبر الظن باطلة أحياناً [٣] : وهذه حقيقة تُظهر مزايا تعريف كانتور الذى سنذكره الآن .

٢٧٧ – يعرف كانتور المتواصل continuum فى مقالته المتأخرة كما يأتى :

نبدأ من (بند ٩) صنف المتسلسلة المقدمة من الأعداد المنطقة الأكبر من ٠ والأصغر من ١ ، بترتيب مقدارها . ونسمى هذا الصنف η والمتسلسلة من هذا الصنف نعرفها بالعلامات الآتية :

(١) أنها معدودة أى إذا اتخذنا حدودها بترتيب مناسب (وهو ما يجب ان يكون مختلفاً عن الترتيب المعطاة فيه) . أمكننا أن نعطيها تناظر واحد بواحد مع الأعداد الصحيحة المتناهية .

(٢) أنه ليس للمتسلسلة حد أول ولا حد أخير .

---

(١) الباب الحاضر يبحث فى نفس الموضوع الذى بحثه كوتيرا فى مقالته "Sur la définition du Continu" Revue de Métaphysique et Morale, March 1900 . وإنى موافق فى الأساس على هذه المقالة التى يوجد فيها كثير مما ذكرته فى الباب السابق وما سأذكره فى هذا الباب

(٢) Math Annalen, XLVI.

(٣) البراهين الرياضية على مثل هذه النظريات التى ليست معروفة جيداً توجد فى مجلة R. d. M, VII, 3.

(٣) يوجد فيها حد بين كل حدين ، أى المتسلسلة ملتحمة (überall dicht)
وعندئذ يبرهن على أن هذه الخصائص الثلاث تعرف تماماً صنف الترتيب المقدم بواسطة المنطقات ، أى هناك تناظر واحد بواحد بين أى متسلسلتين لهما هذه الخواص الثلاث ، بحيث تناظر الحدود الأولى الحدود الأولى ، والحدود الأخيرة الحدود الأخيرة . ويتقرر ذلك باستخدام الاستنباط الرياضى الذى يمكن تطبيقه بفضل هذه الحقيقة ، وهى أن المتسلسلات من هذا الصنف معدودة . وهكذا جميع المتسلسلات المعدودة والتى لا أول لها ولا آخر endless[1] وملتحمة فهى متشابهة ترتيبيا .
ونشرع الآن (بند ١٠) فى بحث المتسلسلات الأساسية المتضمنة فى أى متسلسلة م أحادية البعد one - dimensional . فنبين (كما شرحنا من قبل) المقصود من تسمية متسلسلتين أساسيتين متماسكتين coherent ، ونعطى تعريفاً ترتيبيا لنهاية المتسلسلة الأساسية نعنى أنه فى حالة المتوالية تأتى النهاية بعد المتسلسلة كلها ولكن كل حد قبل النهاية يأتى قبل حد مّا من المتسلسلة . وهناك تعريف مناظر لذلك لنهاية المتراجعة . ونثبت أنه لا يمكن لأى متسلسلة أساسية أن يكون لها أكثر من نهاية واحدة ، وأنه إذا كان للمتسلسة الأساسية نهاية ، فهذه أيضاً نهاية جميع المتسلسلات المتماسكة . وكذلك المتسلسلتان الأساسيتان التى تكون إحداهما جزءاً من الأخرى فهما متماسكتان . وأى حد من حدود م الذى هو نهاية متسلسلة مّا فى م ، يسمى حداً « رئيسياً » principal فى م فإذا كانت جميع حدود م رئيسية ، تسمى م « متكثفة فى ذاتها » -insichdicht) (condensed in it self و إذا كانت كل متسلسلة رئيسية من م لها نهاية فى م ، تسمى م « مقفلة » closed (albgeschlossen)[2]

وإذا كانت م مقفلة ومتكثفة فى ذاتها معاً فهى كاملة perfect . وجميع هذه الخواص إذا كانت منتمية لـ م فإنها تنتمى لأى متسلسلة متشابهة ترتيبيا مع م . وبهذه التمهيدات نخلص أخيراً إلى تعريف المتواصل (بند ١١) . ليكن صنف المتسلسلة التى إليها تنتمى الأعداد الحقيقية من ٠ إلى ١ ، بما فيها كل من الصفر والواحد . وعندئذ تكون كما نعرف صنفاً كاملا ، ولكن هذا وحده لا يميز ،

---

(١) يشرح المؤلف لفظة endless بقوله لاأول لها ولا آخر· Having neither beginning nor end
(٢) ولا ينبغى الخلط بين هذه و بين المعنى الأول للمقفلة الذى ناقشناه فى الجز الرابع .

إذ لها أكثر من ذلك خاصية الاشتمال فى داخلها على متسلسلة من الصنف θ الذى إليه تنتمى المنطقات ، وبحيث يكون بين كل حدين من متسلسلة θ حدود من متسلسلة η . ويترتب على ذلك التعريف التالى للمتواصل :

المتواصل م الأحادى البعد هو متسلسلة (١) كاملة (٢) تشتمل فى داخلها على متسلسلة معدودة ل فيها حدود بين أى حدين من م .

وليس من الضرورى فى هذا التعريف إضافة الخواص الأخرى اللازمة لبيان أن ل من طراز η . لأنه إذا كان ل له حد أول أو أخير كان ذلك هو الحد الأول أو الأخير لمتسلسلة م . وعندئذ يمكن أن نطرحها من ل وتحقق المتسلسلة الباقية الشرط (٢) ولكن دون أن يكون لها حد أول أو أخير . والشرط (٢) مأخوذاً مع الشرط (١) يضمن أن تكون ل متسلسلة ملتحمة . ويبرهن كانتور على أن أى متسلسلة م تحقق الشرطين المذكورين فهى متشابهة ترتيبيا مع المتواصل العددى number-continuum، أى الأعداد الحقيقية من ٠ إلى١ بما فيها كلا الصفر والواحد . ويترتب على ذلك أن التعريف المذكور يشتمل بالضبط على نفس فصل المتسلسلات مثل التى كان تعريفه الأول يشتمل عليها . إنه لا يقرر أن هذا التعريف الجديد ترتيبى بحت، وربما كان من المشكوك فيه لأول وهلة أنه كذلك . ولننظر نحن هل هناك أفكار فوق الترتيبية يشتمل التعريف عليها .

٢٧٨ ــ النقطة الوحيدة التى يمكن أن يثار بشأنها أى شك فهى الخاصة بالشرط أن تكون معدودة . فالقول بأن المجموعة معدودة يدل على أن حدود هذه المجموعة هى جميع حدود متوالية مَّا . وهذه الفكرة إلى هذا الحد ترتيبية بحتة . ولكن فى الحالة المفروضة مثل حالة المنطقات أو أى متسلسلة شبيهة ترتيبياً ، فلا بد أن تكون الحدود المكونة للمتسلسلة قابلة لترتيبين تكوِّن فى أحدهما متسلسلة ملتحمة وفى الآخر متوالية . والكشف عن مجموعة من الحدود أقابلة هى لهذين الترتيبين أو ليست قابلة يحتاج بوجه عام إلى شروط غير الشروط الترتيبية . ومع ذلك فالفكرة نفسها ترتيبية بحتة . ونحن نَعْرِف من تشابه جميع مثل هذه المتسلسلات مع متسلسلة المنطقات (التى إنما تتطلب أفكاراً ترتيبية فقط) أنه لا متسلسلة من مثل هذه المتسلسلات

كاملة . ولكن يبقى أن نبحث هل من الممكن أن نثبت ذلك دون رجوع إلى الخواص الخاصة بالمنطقات التى تنجم عن كونها متسلسلة، المسافة موجودة فيها . ونحن نعرف فى الواقع أنه لا يمكن أن تكون متسلسلة معدودة لها كاملة[1]، ولكننا نحتاج ههنا إلى برهان ترتيبى بحت على هذه النظرية .ومع ذلك فمن السهل إعطاء مثل هذا البرهان . خذ مثلا حدود متسلسلتنا الملتحمة ل المعدودة بالترتيب الذى تكون فيه متوالية ، ولتسمها بهذا الترتيب ى . فإذا بدأنا بهذا الترتيب الذى سنسميه $س_ن$ ، فلا بد أن يكون هناك حد يتبع هذا الحد فى الترتيب الآخر ل . ثم خذ أول حد مثل $س_١$ كالحد الثانى فى متسلسلة أساسية ف . هذا الحد له عدد متناه من السوابق فى المتوالية ى، وإذن فله توالى فى ل هى أيضاً توالى فى ى، لأن عدد التوالى فى ل هو أبداً لا نهاية له .

ثم خذ أول هذه التوالى المشتركة، وليكن $س_٢$ كالحد الثالث فى متسلسلتنا الأساسية ف . فإذا سرنا فى هذا الطريق استطعنا تكوين متسلسلة أساسية صاعدة فى ل حدودها لها نفس الترتيب فى ى كما هو فى ل . هذه المتسلسلة لا يمكن أن يكون لها نهاية فى ل ، لأن كل حد $س_م$ يتلو فى ل كل حد يسبقه فى ى . إذن أى حد من حدود ل سيتجاوزه حد ما $س_م$ من متسلسلتنا الأساسية الأساسية ف ، فإذن ليس لهذه المتسلسلة الأساسية نهاية فى ل . وبناء على ذلك النظرية القائلة بأن المتسلسلة المعدودة والتى لا أول لها ولا آخر لا يمكن أن تكون كاملة هى نظرية ترتيبية بحتة . وحينئذ لن نواجه فيما بعد أى صعوبة ، وتمكننا نظريتنا الأولى عن القطع من تقرير المسألة ببساطة . إذا علمت متسلسلة ل معدودة ولا أول لها ولا آخر وملتحمة ، فاشرع فى تكوين جيمع القطع المعرفة بالمتسلسلة الأساسية فى ل . هذه القطع تكوّن متسلسلة كاملة ، وبين أى حدين من متسلسلة القطع يوجد قطعة نهايتها العليا (أو الدنيا) حد من حدود ل . والقطع من هذا النوع والتى يمكن أن نسميها قطعاً منطقة هى متسلسلة من نفس الصنف مثل ل ومتضمَّنة فى متسلسلة القطع كلها بالطريقة المطلوبة . وبذلك يكون التعريف الترتيبى للمتواصل تاماً .

٢٧٩ ــ لا بد لنا من افتراض أن الاتصال بحسب التعريف المذكور إنما

(١) Acta Mathematica, 11, p. 409

يمكن أن نضرب له أمثلة فى الحساب بالطريق غير المباشر من الأعداد الصحيحة إلى المنطقات ، ومن ثم إلى الأعداد الحقيقية . وعلى العكس الأعداد الصحيحة نفسها يمكن أن نجعلها توضح الاتصال . ولتعتبر جميع فصول الأعداد الصحيحة اللامتناهية الممكنة ، ولترتبها بالطريقة الآتية .

إذا علم فصلان ى ، ف وكان أصغر عدد فى ى أصغر من أصغر عدد فى ف فإن ى يأتى أولا . فإذا كانت الحدود النونية الأولى فى ى ، ف متطابقة ، إلا أن الحد الذى ترتيبه ن + ١ فى كل منهما يختلف عن الآخر ، فإن الذى فيه الحد النونى + ١ أصغر يأتى أولا . وهذه المتسلسلة لها حد أول وهو فصل الأعداد الصحيحة كله ، ولكن ليس لها حد أخير . ومع ذلك فأى قطعة مكملة completed من المتسلسلة فهى متسلسلة متصلة ، مما يستطيع القارئ أن يتبينه بسهولة لنفسه . والمتسلسلة الملتحمة المعدودة المتضمنة فيها مكونة من تلك الفصول اللامتناهية التى تشتمل على جميع الأعداد الأكبر من عدد ما ، أى تلك التى تشتمل على جميع الأعداد ما خلا عدداً متناهياً من الأعداد . وبذلك تكون فصول الأعداد الصحيحة المتناهية وحدها كافية فى توليد متسلسلات متصلة continuous .

٢٨٠ – سنلاحظ أن التعريف المذكور يعتمد على المتواليات . ولما كانت المتواليات هى عين جوهر الانفصال ، فقد يبدو من التناقض أن نحتاج إليها فى فى تعريف الاتصال[١] .

ومهما يكن من شىء لما كان مما لا ريب فيه أن الناس لم يتعودوا أن يضيفوا إلى لفظة الاتصال معنى دقيقاً ، فالتعريف الذى نأخذ به تعريف تحكمى إلى حد ما . فالمتسلسلات التى لها الخواص المذكورة فى تعريف كانتور تسمى بوجه عام متصلة ، ولكن ذلك ينطبق أيضاً على كثير من المتسلسلات التى استبعدها التعريف . على أى حال من المفيد البحث ماذا يمكن أن نصنع بالمتسلسلات الملتحمة بدون المتواليات .

---

(١) بين الأستاذ هوايتهيد أن التعريف الأسهل التالى مكافئ لتعريف كانتور : تكون المتسلسلة متصلة عندما (١) يكون لكل قطعة عليها أو دنيا نهاية ، ويكون للمتسلسة حد أول وأخير (٢) المتسلسلة الملتحمة المعدودة متضمنة فى تلك بحيث يوجد حدود من المتسلسلة الثانية بين أى حدين من متسلسلتنا الأصلية . وفى هذا التعريف لا تدخل المتواليات إلا عند تعريف المتسلسلة المعدودة .

وليكن ى متسلسلة ملتحمة لا أول لها ولا آخر علاقتها المولدة ف ، ولا نعرف عنها شيئاً أكثر من ذلك . عندئذ يمكن بواسطة أى حد أو فصل من الحدود فى ى تعريف قطعة فى ى . ولنرمز بالرمز ى إلى فصل جميع القطع الدنيا فى ى . ويحسن بنا إعادة ما ذكرناه عن القطع الدنيا فنقول : القطعة هى فصل ف من الحدود المتضمنة فى ى ، وهو فصل ليس صفراً، ولا متماداً مع ى ، وبحيث لا يكون له حد أخير ، وكل حد يسبق ف فهو أحد ف . وإذا كانت الحالة بالعكس ، حين يكون ف ليس له حد أول ، وكل حد يتبع أحد ف فهو أحد ف ، سمى ف قطعة عليا . ومن السهل عندئذ إثبات أن كل قطعة تتكون من جميع الحدود السابقة (أو التالية) على حد مفرد من ى ، أو على حد متغير من فصل ما من حدود ى : وأن كل حد مفرد ، وكل فصل من الحدود ، يعرف بهذه الطريقة قطعة عليا وقطعة دنيا . إذن إذا كان ف يدل على فصل القطع العليا ، فمن السهل إثبات أن كلا ى ، ف هما مرة أخرى متسلسلتان ملتحملتان لا أول لهما ولا آخر ، علاقتهما المولدة هى علاقة الكل أو الجزء . على حين أنه إذا كان ى له طرف أو طرفان فكذلك ى ، ف ، ولو أن حدود الأطراف ليست حسب التعريف قطعاً . فإذا انتقلنا الآن إلى بحث القطع فى ى أو ف (ى مثلا) سنجد أن قطع الياءات المعرفة بأى فصل كان من ى يمكن دائماً أن تعرف بفصل مفرد ى الذى إذا كان الفصل لامتناهياً ولم يكن له حد أخير فهو النهاية العليا للفصل ، والذى يكون فى جميع الأحوال حاصل الجمع المنطقى لجميع أعضاء الفصل — وهى أعضاء كما نذكر هى كلها ذاتها فصول متضمنة فى ى[1] . يترتب على ذلك أن جميع الفصول المتضمنة فى ى ، وليس لها حد أخير ، فلها نهاية عليا فى ى . وكذلك (وهذه قضية متميزة) جميع الفصول المتضمنة فى ى ، وليس لها حد أول فلها نهاية دنيا فى ى فيما عدا الحالة التى تكون فيها النهاية الدنيا هى الصفر المنطقى أو الفصل الصفرى . والنهاية الدنيا هى دائماً حاصل الضرب المنطقى لجميع الفصول المكونة

---

(١) تعريف حاصل الجمع المنطقى لأعضاء فصل الفصول بصورة لا يدخل فيها التناهى يرجع فيما أعتقد إلى بيانو . ويجرى التعريف كالآتى : ليكن و فصل فصول ، عندئذ حاصل الجمع المنطقى لأعضاء و هو فصل حدود س بحيث يوجد فصل ما ينتمى لو ينتمى إليه س . انظر Formulaire, Vol. II, (1897) No. 461 Part 1

للفصل الذى هى نهاية له . وهكذا بإضافة الفصل الصفرى إلى ى نضمن أن يكون ى متسلسلة مقفلة . وهناك معنى فى قولنا إنّ ى متكثفة فى ذاتها وهو هذا : كل حد من ى هو النهاية العليا لفصل مختار اختياراً مناسباً متضمن فى ى ، لأن كل حد من ى هو النهاية الدنيا لقطع تلك الياءات التى تعرفه . وكل حد فى ى هو النهاية الدنيا لفصل تلك الياءات التى هى جزء صحيح منه . ولكن ليس هناك على الإطلاق أى برهان ، على الأقل فيما استطعت أن أتبينه حتى الآن ، على أن كل حد من ى هو النهاية العليا أو الدنيا لمتسلسلة « أساسية » . وليس هناك سبب « أولى » لماذا كانت فى أى متسلسلة نهاية أى فصل كذلك دائماً نهاية متسلسلة أساسية . ويبدو فى الواقع أن هذه هى مزية متسلسلة من الأصناف التى تنتمى إليها المنطقات والأعداد الحقيقية على التوالى . أما فى حالتنا هذه على الأقل فإن متسلستنا ولو أنها بالمعنى العام المذكور متكثفة فى ذاتها ، فلا يبدو أن هناك سبباً لافتراض أن حدودها كلها نهايات لمتسلسلات أساسية ، وبهذا المعنى الخاص ربما لا تكون المتسلسلة متكثفة فى ذاتها .

٢٨١ — من المفيد بحث نتيجة قصر حدود ى على مثل تلك القطع التى يمكن تعريفها بالمتسلسلات الأساسية . وفى هذه الحالة يحسن أن ننظر علاوة على القطع العليا والدنيا إلى متمماتها supplements كما قد تسمى ، والتى سأعطى الآن تعريفها . ولتكن متسلسلة ملتحمة ف متولدة بعلاقة متعدية لا متماثلة ق ، ولتكن ى أى متسلسلة أساسية فى ف . فإذا كان للحدود الأولى من ى مع الحدود الأخيرة العلاقة ق ، سمينا ى « متوالية » . وإذا كانت العلاقة ق سمينا ى « متراجعة » . والآن إذا كان و أى فصل اتفق متضمناً فى ف ، فإن و يعرف كما رأينا من قبل أربعة فصول أخرى فى ف ، وهى :

(١) فصل الحدود قبل كل و ، وسأسميه و Π

(٢) فصل الحدود بعد كل و وسأسميه و $\breve{\Pi}$

(٣) فصل الحدود قبل و ما ، وسأسميه Π و

(٤) فصل الحدود بعد و ما ، وسأسميه $\breve{\Pi}$ و

فالفصلان (٣) ، (٤) القطعتان الدنيا العليا على الترتيب ؛ والفصلان

(١) ، (٢) متممان لـ (٤) ، (٣) على الترتيب ، وسأسميهما قطعتين متممتين supplemental . فإذا كان و له نهاية عليا فهى الحد الأول ا و $\breve{\Pi}$ ، وبذلك لا يكون و $\breve{\Pi}$ قطعة ما دام لا قطعة عليا لها حد أول . ولكن حين يكون و ليس له نهاية عليا عندئذ و $\breve{\Pi}$ قطعة سواء كان و متناهياً أو لامتناهياً. وتنطبق ملاحظات شبيهة بذلك على النهايات الدنيا . فإذا كان و له حد أخير ، فهذا الحد لا ينتمى لا إلى Π و ولا إلى و $\breve{\Pi}$ ، ولكن جميع الحدود الأخرى لها حد أخير لا ينتمى لا إلى Π و ولا إلى و $\breve{\Pi}$ ، بل جميع الحدود الأخرى فى ف تنتمى لفصل أو لآخر . وإذا كان و ليس له حد أخير ، فجميع حدود ف تنتمى إلى Π و أو و $\breve{\Pi}$.

وتنطبق ملاحظات شبيهة بذلك على و Π ، $\breve{\Pi}$ و . وبتطبيق هذه التعريفات العامة على حالات المتواليات والمتراجعات ، ستجد أنه بالنسبة للمتوالية الفصلين (٢) ، (٣) فقط مهمين ، وللمتراجعة الفصلين (١) ، (٤) فقط . أما السؤال عن المتوالية أين تبدأ ، وعن المتراجعة أين تنتهى فليست له أى أهمية . وإذ كانت المتوالية ليس لها حد أخير ، ولا للمتراجعة حد أول ، فالقطعة المعرفة بأيهما مأخوذة مع متممتها تشتمل على كل حد فى ف . أما هل المتواليات والمتراجعات فى ف لها نهايات دائماً أو أحياناً ، أو ليست لها نهايات أبداً ، فيبدو أنه لا سبيل لمعرفة ذلك من المقدمات الموجودة لدنيا . ولم أتمكن من الكشف عن مثال لمتسلسلات ملتحمة ليس لها نهايات ألبتة ، ولكنى عاجز عن إقامة دليل على استحالة مثل هذه الحالة .

فإذا انتقلنا الآن إلى فصول القطع كما انتقلنا من قبل للنظر فى الفصل ى ، فعندنا أربعة من مثل هذه الفصول هى :

(١) الفصل ف Π وكل حد من حدوده هو الفصل ى Π تعرفه متراجعة مّا ى ، أى حدود ف التى تأتى قبل جميع حدود متراجعة ما فى ف .

(٢) الفصل ف $\breve{\Pi}$ المشتمل على جميع فصول ى $\breve{\Pi}$ المعرَّفة بالمتوالية ى .

(٣) الفصل Π ف الذى حدوده هى Π ى حيث ى متوالية ما .

(٤) الفصل ف Π الذى حدوده هى ى Π حيث ى متراجعة ما . وكل من هذه الفصول الأربعة فصل فصول ، لأن حدوده هى فصول متضمنة فى ف . وكل

من الأربعة هو بنفسه متسلسلة ملتحمة . وليس ثمة سبيل إلى البرهنة فيما أعلم على أن (١) ، (٣) أو (٢) و (٤) لهما أى حدود مشتركة . وربما كان لكل زوج حد مشترك إذا احتوى ف على متوالية ومتراجعة متماسكتين ، وليس له نهاية فى ف . ولكن لا سبيل لمعرفة ما إذا كانت هذه الحالة هل تنشأ فى المتسلسلة ف المعلومة أو لا .

وعند ما نبحث فى أمر الفصول الأربعة المعرفة على ذلك النحو أهى متكثفة فى ذاتها ، فإننا نحصل على أعجب النتائج . فكل متسلسلة أساسية فى أى فصل من الفصول الأربعة لها نهاية ، ولكن ليس من الضرورى أن تكون هذه النهاية فى المتسلسلة التى تتركب من حدودها ، وبالعكس كل حد فى كل فصل من الفصول الأربعة فهو نهاية متسلسلة أساسية ، ولكن ليس بالضرورة متسلسلة فى نفس الفصل الذى ينتمى إليه حد النهاية . ويمكن تقرير الأمر على النحو الآتى :

كل متوالية Π فى ف أو Π ف فلها نهاية فى Π ف

كل متوالية $\breve{\Pi}$ فى ف أو $\breve{\Pi}$ ف فلها نهاية فى Π ف

كل متراجعة فى ف Π أو Π ف فلها نهاية فى ف Π

كل متراجعة فى ف $\breve{\Pi}$ أو $\breve{\Pi}$ ف فلها نهاية فى ف $\breve{\Pi}$

كل حد فى ف Π فهو نهاية متراجعة فى ف Π وأخرى فى Π ف

كل حد فى ف $\breve{\Pi}$ فهو نهاية متراجعة فى ف Π وأخرى فى $\breve{\Pi}$ ف

كل حد فى Π ف فهو نهاية متوالية فى ف Π وأخرى فى Π ف

كل حد فى $\breve{\Pi}$ ف فهو نهاية متوالية فى ف $\breve{\Pi}$ وأخرى فى $\breve{\Pi}$ ف

ومن ثمّ كان :

ف Π متطابقاً مع فصل نهايات المتراجعات فى ف Π أو Π ف

ف $\breve{\Pi}$ متطابقاً مع فصل نهايات المتراجعات فى ف $\breve{\Pi}$ أو $\breve{\Pi}$ ف

Π ف متطابقاً مع فصل نهايات المتواليات فى ف Π أو Π ف

$\breve{\Pi}$ ف متطابقاً مع فصل نهايات المتواليات فى $\breve{\Pi}$ ف أو ف $\breve{\Pi}$

وهكذا كل فصل من فصولنا الأربعة له نوع من الكمال من جانب واحد ؛

فصلان من الأربعة كاملان من جانب واحد ، والفصلان الآخران من الجانب الآخر . ولكنى لا أستطيع أن أبرهن على أن أى فصل من الأربعة كامل كلية . وربما نحاول الجمع بين ف Π ، Π ف وكذلك بين ف Π ، $\breve{\Pi}$ ف . لأن ف Π ، Π ف . مأخوذين معاً ، يكونان متسلسلة واحدة علاقتها المولدة لا تزال علاقة كل وجزء . وهذه المتسلسلة ستكون كاملة وستشتمل على السواء على نهايات متواليات ومتراجعات فى نفسها . ولكن هذه المتسلسلة ربما لا تكون ملتحمة لأنه إذا وجدت أى متوالية ى ومتراجعة ىَ ، فى ف ، وكلاهما لهما نفس النهاية فى ف (وهى حالة كما نعرف تحصل فى بعض المتسلسلات الملتحمة) ، إذن Π ى ، ى $\breve{\Pi}$ سيكونان الحدود المتعاقبة للمتسلسلة المكونة من Π ف ، ف Π معاً ، لأن ىَ Π سيشتمل على النهاية المشتركة على حين أن Π ى لن يشتمل عليها ، ولكن جميع الحدود الأخرى فى ف ستنتمى إلى كليهما أو لا تنتمى إلى أيهما. ومن ثم إذا كانت متسلسلتنا ملتحمة فلا يمكن أن نبين أنها كاملة . وحين نجعلها كاملة يمكن أن نبين أنها ربما لا تكون ملتحمة . والمتسلسلة التى ليست ملتحمة فيصعب أن تسمى متصلة .

ومع أننا نستطيع أن نثبت فى متسلسلتنا الأصلية الملتحمة ف أن هناك عدداً لامتناهياً من المتواليات المتماسكة مع متوالية معلومة ، وليس لها أى حد مشترك معها ، فلا يمكننا إثبات وجود ولو متراجعة واحدة متماسكة مع متوالية معلومة ، ولا كذلك إثبات أن أى متوالية أو متراجعة فى ى لها نهاية ، أو أن أى حد من حدود ف فهو نهاية متوالية أو متراجعة . لا يمكننا إثبات أن أى متوالية ى ومتوالية ىَ فهما بحيث Π ى = ىَ Π بل ولا أن Π ى ، ىَ Π قد لا يختلفان إلا بحد مفرد فقط من حدود ف .

بل ولا يمكننا أخيراً إثبات أن أى متوالية مفردة فى ف Π لها نهاية فى ف Π ، بقضايا شبيهة بذلك فيما يختص بالفصول الثلاثة الأخرى ف $\breve{\Pi}$ ، Π ف ، $\breve{\Pi}$ ف . على الأقل فإنى عاجز عن اكتشاف أى طريقة لإثبات أى نظرية من هذه النظريات ، ولو أنه عند غياب الأمثلة على بطلان بعضها فلا يظهر من غير المتحمل أنها ربما تقبل البرهنة عليها .

فإذا كان من الواقع – كما يظهر – أننا إذا بدأنا فقط من متسلسلة ملتحمة

كانت أكثر النظريات الجارية لا مبرهنة ، تبين لنا مقدار أهمية اعتماد نظرية كانتور الترتيبية على الشرط القائل بأن المتسلسلة الملتحمة التى نبدأ منها لا بد أن تكون معدودة وحالما نضع هذا الفرض يصبح من السهل إثبات جميع تلك القضايا المذكورة ، التى تصح بالنسبة للصنفين η ، θ على التوالى . وهذه الحقيقة من الواضح أنها ذات أهمية فلسفية عظيمة ، ولزيادة توضيحها قد أطنبت فى الكلام عند المتسلسلات الملتحمة المفروض أنها غير معدودة .

٢٨٢ــ الملاحظة التى أبديناها توًّا من أن متسلسلتين ملتحمتين قد يأتلفان لتكوين متسلسلة واحدة لها أحياناً حدود متعاقبة ، ملاحظة أدنى إلى الغرابة ، وتنطبق كذلك على الاتصال بحسب تعريف كانتور له . فقطع المنطقات تكوِّن متسلسلة متصلة ، وكذلك القطع المكمَّلة (أى القطع المأخوذة مع نهاياتها) . ولكن الاثنتان معاً تكونان متسلسلة ليست ملتحمة ولذلك ليست متصلة . ومما يتعارض بكل تأكيد مع الفكرة الجارية عن الاتصال أن المتسلسلة المتصلة تبطل أن تكون كذلك بمجرد إدخال حدود جديدة بين الحدود القديمة ، لأن هذا لا بد بحسب الأفكار الجارية أن يجعل متسلسلتنا أكثر اتصالا . قد يقال فلسفياً إن المتسلسلة لا يمكن أن تسمى متصلة إلا إذا كانت « تامة » complete ، أى تشتمل على حد معين مأخوذ مع جميع الحدود التى لها مع هذا الحد المعين علاقة لا متماثلة متعدية متخصصة أو عكس هذه العلاقة . فإذا أضفنا هذا الشرط فليست متسلسلة قطع المنطقات تامة بالنسبة للعلاقة التى بواسطتها اعتبرناها حتى الآن متولدة ، ما دامت لا تتكون من جميع فصول المنطقات التى لها مع قطعة معلومة علاقة الكل والجزء ، والتى يشتمل كل منها على جميع الحدود الأصغر من أى واحد من حدودها ــ وهذا الشرط متحقق كذلك بواسطة القطع المكمَّلة . ولكن كل متسلسلة فهى تامة بالنسبة لعلاقة مَّا بسيطة أو مركبة . وهذا هو السبب فى أن التمام completeness لا يحتاج من وجهة النظر الرياضية أن يذكر فى تعريف الاتصال ، ما دام من الممكن دائماً ضمانه باختيار مناسب للعلاقة المولدة .

رأينا الآن ما يقوم عليه تعريف كانتور للاتصال ، ورأينا أنه على حين يمكن أن توجد أمثلة تحقق التعريف فى الحساب ، إلا أن التعريف نفسه ترتيبى بحت ــ

الشيء الوحيد المحتاج إليه هو متسلسلة ملتحمة معدودة . وسواء أكان نوع المتسلسلات التى يعرفها كانتور على أنها متصلة مما يظن أنها أكثر الأشياء شبهاً بالمدلول عليه حتى الآن بهذه اللفظة أم لم يكن ، فالتعريف نفسه ، والخطوات المؤدية إليه ، لابد أن نعترف بأنه نصر للتحليل والتعميم .

وقبل الخوض فى المسائل الفلسفية المثارة بواسطة المتواصل يحسن أن نتابع عرض أهم نظريات كانتور ، وذلك ببحث نظريته عن الأعداد الأصلية المتصاعدة ، والأعداد والترتيبية . ونحن لم نبحث حتى الآن إلا فى إحدى المشكلتين المخصصتين لهذا الجزء ، وهى مشكلة الاتصال . وقد حان الوقت للنظر فيما تقول به الرياضيات عن اللانهاية . فإذا تم لنا ذلك أصبحنا فى موقف يجعلنا قادرين على مناقشة المشكلات الفلسفية الأوثق ارتباطاً باللانهاية والاتصال .

الباب السابع والثلاثون

الأصليات المتصاعدة

۲۸۳ – يمكن أن يقال إن النظرية الرياضية للانهاية تكاد تبدأ بكانتور . فالحساب اللانهائى الصغر ، ولو أنه لا يمكن أن يستغنى تماماً عن اللانهاية إلا أن صلته به قايلة ما أمكن ، وهو يسعى إلى إخفاء هذه الصلة قبل أن تظهر إلى العيان . أما كانتور فقد ضرب بسياسة النعامة عرض الحائط وأزاح الستار عن الهيكل الحق . كان ذلك الهيكل ، مثل كثير غيره ، معتمداً على الستار الذى يخفيه ، فتبدد فى ضوء النور الملقى عليه . ولنترك الاستعارة جانباً ونقول : إن كانتور أنشأ فرعاً جديداً من الرياضيات بين فيه بمحض صحة الاستنباط فقط ، أن المتناقضات المزعومة عن اللانهاية تعتمد كلها على بسط نتائج تشمل اللانهاية ، وهى نتائج ولو أنها يمكن إثباتها فيما يختص بالأعداد المتناهية ، إلا أنها ليست بالضرورة صادقة على « جميع » الأعداد . وفى هذه النظرية من الضرورى أن نبحث الأصليات والترتيبيات كل منهما على حدة ، بل إن خواصهما لتبلغ من التباعد وهما متصاعدان حداً أكثر مما هما متناهيان . وسأبدأ بالنظر فى الأصليات المتصاعدة ، متبعاً فى ذلك نفس الترتيب الذى اتبعته من قبل – وهو ترتيب يظهر لى أنه وحده الصحيح فلسفياً[1] .

٢٨٤ – الأصليات المتصاعدة، التى تسمى أيضاً « قوى » powers قد تعرّف أولا بحيث تشمل الأصليات المتناهية ، مع ترك التمييز بين المتناهية والمتصاعدة ليبحث فيما بعد . وفى ذلك يعطى كانتور التعريف الآتى[2] :

« نسمى قوة م أو عدده الأصلى تلك الفكرة العامة التى تستنبط بواسطة ملكة الفكر الفعالة عندنا من المجموعة م بالتجريد من طبيعة عناصرها المتعددة ومن الترتيب المعطاة فيه » .

---

(١) هذا هو الترتيب المتبع فى Math. Annalev, XLVI, ولكنه غير متبع فى Mannichfultigkeitslehre

(٢) Math nnalev, XLVI, § 1

وهذا كما نرى إنما هو مجرد عبارة تدل على ما نتكلم عنه وليس تعريفاً صحيحاً . فهو يفترض من قبل أن كل مجموعة لها مثل تلك الخاصية المذكورة — خاصية يمكن القول إنها مستقلة عن طبيعة حدودها وترتيبها، وربما نضيف إلى ذلك أنها معتمدة فقط على عددها .

الواقع يأخذ كانتور العدد على أنه فكرة أولية primitive ، وأن كل مجموعة لها عدد فهي قضية أولية .ومن أجل ذلك كان متسقاً في إعطاء تخصيص للعدد ليس تعريفاً صورياً .

ومع ذلك فبواسطة مبدأ التجريد يمكن أن نعطي كما رأينا في الجزء الثاني تعريفاً صورياً للأعداد الأصلية . وهذه الطريقة يعطيها كانتور في الأمور الأساسية مباشرة بعد التعريف غير الصوري السابق الذكر . وقد رأينا من قبل أنه إذا أطلق على فصلين أنهما «متشابهان» حين توجد علاقة واحد بواحد تزاوج بين كل حد من الفصل الأول مع حد واحد لا غير من الفصل الثاني ، عندئذ يكون التشابه متماثلا ومتعدياً ، ويكون منعكساً لجميع الفصول . وينبغي ملاحظة أن علاقة واحد بواحد يمكن تعريفها دون أي إشارة للعدد كما يأتي : تكون العلاقة علاقة واحد بواحد إذا كان س له العلاقة مع ص، وكان سَ مختلفاً عن س ، وكذلك صَ عن ص ، إذن سَ لا تكون له العلاقة مع ص ولا س مع صَ. وليس في هذا أي إشارة إلى العدد ، ويتبع ذلك أن تعريف التشابه يخلو أيضاً من مثل هذه الإشارة . وما دام التشابه منعكساً ومتعدياً ومتماثلا أمكن تحليله إلى حاصل ضرب علاقة واحد بواحد وعكسها ويدل على الأقل على خاصية مشتركة للفصول المتشابهة . وهذه الخاصية أو إذا كانت هناك عدة خواص ، فواحدة منها يمكن تسميتها العدد الأصلي للفصول المتشابهة وتكون علاقة الكثير بالواحد هي علاقة فصل بعدد حدوده . ولكي نقف عند شيء واحد معين مثل العدد الأصلي لفصل معلوم ، فعلينا أن نطابق بين عدد فصل وبين فصل الفصول كله المشابه للفصل المعلوم . وهذا الفصل إذا أخذ كشيء مفرد فله — كما يتبين من برهان مبدأ التجريد — جميع الخواص المطلوبة من العدد الأصلي . ومع ذلك فهذه الطريقة معرضة فلسفياً للشك الناجم من التناقض الذي ذكرناه في الباب العاشر من الجزء الأول[1] .

---

(١) انظر الملحق .

بهذه الطريقة نحصل على تعريف العدد الأصلى للفصل . وما دام التشابه منعكساً بالنسبة للفصول ، فلكل فصل عدد أصلى . وربما يظن أن هذا التعريف إنما ينطبق على الفصول المتناهية لأننا كى نبرهن على أن « جميع » حدود فصل واحد فهى مترابطة مع جميع حدود فصل آخر ، فقد يظن أن العد التام أمر ضرورى ، وليست هذه مع ذلك هى الحالة ، كما يمكن أن نتبين لأول وهلة باستبدال « أى » بدلا من « جميع » — و«أى» لفظة مُؤْثَرَةٌ بوجه عام حيث نكون بصدد فصول لامتناهية . ويكون فصلا ى ،ف متشابهين إذا وجدت علاقة ما واحد بواحد ع بحيث إنه إذا كان سہ أى حد فى ى فهناك حد مَّا صہ فى ف بحيث يكون سہ ع صہ . وإذا كان صہَ أى حد فى ف ، فهناك حد مَّا سہَ فى ى بحيث يكون سہَ ع صہَ . ولا حاجة لنا ههنا ألبتة إلى العد الكامل بل نحتاج فقط إلى قضايا تختص « بأى ى » و « أى ف» . مثال ذلك أن النقط على خط معلوم تشبه الخطوط التى تمر بنقطة معلومة وتلتقى بالخط المعلوم . لأن « أى » نقطة على الخط المعلوم تحدد خطاً واحداً ولا غير يمر بالنقطة المعلومة ، و « أى » خط يمر بالنقطة المعلومة ويلتقى بالخط المعلوم يحدد نقطة واحدة ولا غير على الخط المعلوم . وهكذا حيث تكون فصولنا لامتناهية فإننا نحتاج إلى قضية ما عامة عن « أى » حد فى كل من الفصلين لقيام التشابه ، ولكننا لا نحتاج إلى العد . ولكى نثبت أن كل (أو أى) فصل له عدد أصلى ، فإنما نحتاج إلى ملاحظة أن أى حد فى أى فصل فهو متطابق مع نفسه . ولسنا فى حاجة لخاصية انعكاس التشابه إلى أى قضية عامة أخرى عن حدود الفصل .

٢٨٥ — ولنشرع الآن فى بحث الخواص الرئيسية للأعداد الأصلية . ولن أعطى براهين على أى خاصية من هذه الخواص خشية تكرار ما نقلناه عن كانتور . وإذا بحثنا أولا فى علاقاتها بالفصول فقد نلاحظ أنه إذا وجدت مجموعتان من الفصول متشابهة الأزواج ، وليس لأى اثنين من المجموعة الواحدة جزء مشترك ، بل ولا لأى اثنين من المجموعة الأخرى ، إذن حاصل الجمع المنطقى لجميع فصول إحدى المجموعتين يشابه حاصل الجمع المنطقى لجميع فصول المجموعة الأخرى . وهذه القضية المألوفة فى حالة الفصول المتناهية تصح كذلك بالنسبة للفصول اللامتناهية

ثم إن العدد الأصلي للفصل ى يقال إنه أكبر من العدد الأصلي للفصل ف ، حين لا يكون أى جزء من ف مشابهاً ى ، بل هناك جزء من ى يشبه ف . وفى هذه الحالة أيضاً يقال إن عدد ف أقل من عدد ى . ومن الممكن إثبات أنه إذا وجد جزء من ى يشبه جزءاً من ف ، وجزء من ف يشبه جزءاً من ى ، إذن ى ، ف متشابهان[١]. وهكذا نجد أن المساواة والأكبر والأصغر لا يتفق بعضها مع بعضها الآخر ، وهى كلها متعدية ، والأخيرتان لا متماثلة. ونحن لا نستطيع إثبات — ويبدو من المشكوك فيه هل يمكننا هذا الإثبات أصلا — أنه إذا اختلف عددان أصليان فلا بد أن يكون أحدهما أكبر والآخر أصغر[٢]. وينبغى ملاحظة أن تعريف «أكبر» يشتمل على شرط ليس مطلوباً فى حالة الأصليات المتناهية . فإذا كان عدد ف متناهياً ، فيكفى أن يكون جزء مناسب من ى مشابهاً ف . ولكن فى الأصليات المتصاعدة ليس هذا بكاف . إذن كلا الجزأين لازمان لإجراء تعريف عام للأكبر

وهذا الفرق بين الأصليات المتناهية والمتصاعدة ينشأ من تعريف الفرق بين المتناهى واللامتناهى ، وهو أنه حين لا يكون عدد فصل متناهياً ، فللفصل دائماً جزء صحيح مشابه للفصل كله . وبعبارة أخرى كل فصل لامتناه يشتمل على جزء (ومن ثم على عدد لامتناه من الأجزاء) له عين العدد كنفسه . وهناك حالات خاصة معيّنة لهذه القضية عرفت منذ زمن طويل ، وكانت تعتبر بأنها تكوّن تناقضاً فى فكرة العدد اللامتناهى . مثال ذلك أن ليبنتز[٣] يذهب إلى أنه ما دام كل عدد يمكن أن يضاعف ، فإن عدد الأعداد هو نفس عدد الأعداد الزوجية ، ويستنتج من ذلك أن العدد اللامتناهى لا وجود له . وأول من عمم هذه الخاصية عن المجموعات اللامتناهية ، وبحث أمرها على أنها غير متناقضة ، فهو بمقدار ما أعلم بولزانو[٤].

---

(١) هذه هى نظرية برنشتين وشريدر ، وانظر للبرهان Borel, Leçons sur la théorie des fonctions, Paris, 1898, and zermelo. *Gottinger Nochrichten*, 1901, pp. 34 -- 38.

(٢) الأسباب التى يقدمها كانتور على ذلك مبهمة ، ولا يبدو لى أنها صحيحة ، وهى تعتمد على المسلمة القائلة بأن كل فصل فهو مجال علاقة ما محكمة الترتيب . انظر Cantor, *Math. Annalen*, * XLVI, note to § 2.

(٣) Gerhardt's ed. 1, p. 338

(٤) *Paradoxien des Unendlichen*, § 21.

ولكن البرهان الدقيق على القضية حين تعرف الأصليات المتناهية بواسطة الاستنباط الرياضي ، وكذلك البرهان على أنها غير متناقضة ، إنما يرجع إلى كانتور وديديكند . وقد يمكن أن تؤخذ القضية ذاتها على أنها تعريف للمتصاعد من الأعداد الأصلية ، لأنها خاصية تنتمي لجميعها ولا تنتمي لأى عدد من الأصليات المتناهية[١] وقبل أن نمضي فى بحث هذه الخاصية لا بد لنا من الحصول على معرفة أوثق بالخواص الأخرى للأعداد الأصلية .

٢٨٦ — ونصل الآن إلى الخواص الحسابية فقط للأصليات ، نعنى جمعها وضربها ، إلخ[٢] . ويعرف « جمع » الأعداد ، حين تكون متصاعدة ، بالضبط كما عرفناها فى حالة الأعداد المتناهية ، أى بواسطة الجمع المنطقى . إن عدد حاصل الجمع المنطقى لفصلين ليس لهما حد مشترك ، هو مجموع عددى الفصلين . وهذا يمكن أن يمتد بخطوات متتالية ليشمل أى عدد متناه من الفصول . لأن العدد اللامتناهى لفصول وهو الذى يكون فصل فصول ، فإن حاصل جمع أعدادها إذا لم يكن لفصلين منها أى حد مشترك لا يزال هو عدد حاصل جمعها المنطقى — ويكون حاصل الجمع المنطقى لأى فصل فصول متناهياً كان أو غير متناه قابلا للتعريف منطقياً . ويستمر قانونا التبادل والترتيب صحيحين بالنسبة لحاصل جمع عددين أو ثلاثة أعداد معرفةً على هذا النحو ، أى أننا نحصل على ما يأتى :

ا + ب = ب + ا ، ا + (ب + ح) = (ا + ب) + ح

ويعرف كانتور « ضرب » عددين كما يأتى :

إذا كان م ، ں فصلين فيمكننا أن نركب أى عنصر من م مع أى عنصر من ں لتكوين زوج هو (م ، ں) . وعدد جميع مثل هذه الأزواج هو حاصل ضرب أعداد م ، ں . وإذا شئنا تجنب فكرة الزوج فى التعريف فيمكن أن نضع بدلها ما يأتى[٣] : ليكن ى فصل فصول وعدده ا . وليكن كل فصل من

---

(١) **Dedikend**, *Was sind und was sollen die zahlen?* No. 64

(٢) **Cantor** *Math. Annalen*, XLVI, § 3; Whitehead, *American Journal of Math.* Vol. XXIV, No. 4.

(٣) **Vivanti**, *Théories des Ensembles*, *Formulaire de Mathématique*, Vol 1, Part VI. § 2 No. 4. American Journal of Mathematics

هذه الفصول المنتمية ا ى تشتمل على ب من الحدود . بحيث لا يكون لفصلين من هذه الفصول أى حد مشترك ، إذن ا ب هو عدد حاصل الجمع المنطقى لجميع هذه الفصول . وهذا التعريف لا يزال منطقياً بحتاً ويتجنب فكرة الزوج . والضرب معرفاً على هذا النحو يحقق قوانين التبادل والترتيب والتوزيع ، أى أننا نحصل على :
اب = ب ا ، ا (ب ح) = (ا ب) ح ، ا (ب + ح) = اب + ا ح .
ومن ثم فجمع الأعداد الأصلية وضربها حتى حين تكون متصاعدة يحققان جميع قواعد الحساب الابتدائية .

وتعريف قوى عدد (اب) يحصل كذلك منطقياً (انظر بند ٤ من المرجع السابق) . ولهذا الغرض يعرف كانتور أولا ما يسميه تغطيه covering (Belegung) فصل ن بواسطة فصل آخر م . وبمقتضى هذا القانون يرتبط كل عنصر ه من ن بعنصر واحد ولا غير م من م ، ولكن نفس هذا العنصر م قد يرتبط بكثير من عناصر ن . ومعنى ذلك أن التغطية Belegung هى علاقة كثير بواحد ميدانها يشمل ن وبها تترابط دائماً حدود ن مع حدود م . فإذا كان ا عدد الحدود فى م ، وكان ب عدد الحدود فى ن ، إذن عدد جميع مثل هذه العلاقات من الكثير بالواحد يعرف بأنه اب . ومن السهل أن نتبين أن هذا التعريف بالنسبة للأعداد المتناهية يتفق مع التعريف المعتاد . أما بالنسبة للأعداد المتصاعدة فلا تزال الأسس indices لها الخواص المعتادة أى :

اب اح = اب+ح ، اح بح = (اب)ح ، (اب)ح = ابح

وفى الحالة التى تكون فيها ا = ٢ ، فإن اب تقبل تعريفاً أبسط مستنبطاً من التعريف المذكور . فإذا كانت ا = ٢ ، كانت ٢ب عدد الطرق التى يمكن بها أن يتعلق كل حد من حدود ب بواحد من حدين . وعند ما تعلم الحدود المتعلقة بأحد الحدين فإن الباقية تتعلق بالحد الآخر . ومن ثم يكفى فى كل حالة تخصيص فصل الحدود المتعلق بأحد الحدين . وبذلك نحصل فى كل حالة على فصل نفرزه من حدود ب وفى جميع الأحوال نحصل على جميع مثل هذه الفصول . وإذن ٢ب هو عدد الفصول التى يمكن أن تنشأ عن حدود ب ، أو عدد توافيق ب من الأشياء مأخوذة أى عدد فى أى وقت — وهى نظرية مألوفة عند ما يكون ب متناهياً ، وتستمر

صحيحة عند ما يكون ب متصاعداً . ويعطى كانتور برهاناً على أن ٢ب أكبر دائماً من ب — وهو برهان مع ذلك يفضى إلى صعوبات عند ما يكون ب عدد جميع الفصول ، أو بوجه أعم عند ما تكون هناك مجموعة ما من حدود ب تكون فيها جميع المجموعات المفرزة من حدود ب هى نفسها حدود مفردة من ب[١].

وتعريفات الضرب التى أعطاها كانتور وفايفانتى تتطلب أن يكون عدد العوامل فى حاصل الضرب متناهياً، ويلزم عن ذلك إعطاء تعريف جديد مستقل للقوى إذا أجزنا أن يكون الأس لامتناهياً. وقد أعطى الأستاذ هوايتهيد[٢] تعريفاً للضرب يخلو من هذا القيد ، ويسمح من أجل ذلك للقوى أن تعرّف بالطريقة العادية مثل حاصل الضرب . وقد وجد كذلك براهين من القوانين الصورية حين يكون عدد الأشياء المجموعة أو الأقواس أو العوامل لا متناهياً . ويجرى تعريف حاصل الضرب كما يأتى : ليكن ك فصل فصول ليس لأى فصلين منهما حدود مشتركة . ولتفرز لكل طريقة ممكنة حدّا واحدا لا غير من كل فصل من الفصول التى يتكون منها ك ، فإذا فعلنا ذلك بجميع الطرق الممكنة حصلنا على فصل فصول يسمى الفصل الضربى ا ك . ويعرف عدد حدود هذا الفصل بأنه حاصل ضرب عدد الحدود فى شتى الفصول التى هى أعضاء ك . وحيث يكون عدد أعضاء ك متناهياً من السهل أن نتبين أن هذا يتفق مع التعريف العادى . وليكن ى ، ف ، و أعضاء ك ، وليكن حدودها على التوالى هى α ، β ، γ . إذن يمكن إفراز حد واحد من ى بطرق α ، ولكل طريق يوجد β من الطرق لإفراز حد واحد من ف ، ولكل طريق لإفراز حد واحد من ى ، وحد واحد من ف يوجد γ من الطرق لإفراز واحد من و . إذن هناك $\alpha\ \beta\ \gamma$ من الطرق لإفراز حد واحد من كلٍّ ، حين يفهم الضرب بمعناه المعتاد . والفصل الضربى فكرة هامة بواسطتها يمكن أن يتقدم الحساب الأصلى التصاعدى خطوات أكثر مما تقدم به كانتور .

٢٨٧ — تنطبق جميع التعاريف المذكورة على الأعداد الصحيحة المتناهية

---

(١) انظر فيما بعد الباب الثالث والاربعين .

(٢) الموضع السابق من Acta Mathematica II, pp. 306, 313, 326.

والمتصاعدة على حد سواء ، ولا تزال القوانين الصورية للحساب تصح عليها كما نرى . ومع ذلك فالأعداد الصحيحة المتصاعدة تختلف عن المتناهية فى خواص علاقتها بالفصول التى هى أعدادها ، وكذلك بالنسبة لخواص فصول الأعداد الصحيحة ذاتها . الواقع لفصول الأعداد خواص شديدة الاختلاف بحسب ما تكون الأعداد متناهية كلها أو متصاعدة على الأقل جزئياً .

ومن بين الأصليات المتصاعدة بعضها له أهمية خاصة وبوجه خاص الأعداد المتناهية وعدد المتواصل . ومن الواضح أن عدد الأعداد المتناهية ليس هو نفسه عدداً متناهياً ، لأن فصل « العدد المتناهى » شبيه بفصل « العدد المتناهى الزوج » الذى هو جزء من نفسه . وقد يمكن إثبات نفس النتيجة بالاستنباط الرياضى — وهو مبدأ يستخدم كذلك لتعريف الأعداد المتناهية ، ولكنى لن أبحث فى أمره إلا فى الباب التالى ، لأنه من طبيعة ترتيبية أكثر . عدد الأعداد المتناهية هو إذن متصاعد ، ويرمز كانتور إلى هذا العدد بالألف العبرية مع وضع صفر جانبها ، ولكننا سنرمز له بالألف المعتادة للسهولة ، هكذا ا . ويثبت كانتور أن هذا هو أقل جميع الأصليات المتصاعدة ، وذلك من النظريات الآتية (المرجع السابق بند § ٦) .

(ا) كل مجموعة متصاعدة تشتمل على مجموعات أخرى كأجزاء عددها هو ا .

(ب) كل مجموعة متصاعدة هى جزء من أخرى عددها هو ا . فاها كذلك العدد ا .

(حـ) لا مجموعة متناهية تشبه أى جزء صحيح من ذاتها .

(د) كل مجموعة متصاعدة فهى شبيهة بجزء ما صحيح بذاتها[١] .

ويترتب على هذه النظريات أنه لا عدد متصاعداً أصغر من عدد الأعداد المتناهية . والمجموعات التى لها هذا العدد يقال إنها معدودة ، لأنه من الممكن دائماً أن « تعد » مثل هذه المجموعات . بمعنى أنه إذا علم أى حد فى مثل هذه المجموعة فهناك عدد متناه مّا ن بحيث يكون الحد المعلوم هو الحد النونى . وليست هذه إلا

---

(١) النظريتان حـ ، د تحتاجان إلى أن يعرف المتناهى بالاستنباط الرياضى ، وإلا أصبحتا مكررتين .

مجرد طريقة أخرى للقول بأن جميع حدود المجموعة المعدودة لها علاقة واحد بواحد مع الأعداد المتناهية ، وهذا مرة أخرى يكافىء قولنا إن عدد المجموعة هو عين الأعداد المتناهية . ومن السهل أن نرى أن الأعداد الزوجية ، أو الأولية ، أو المربعات الكاملة ، أو أى فصل آخر من الأعداد المتناهية التى ليس لها نهاية عليا تكوّن متسلسلة معدودة . لأننا إذا رتبنا أى فصل من هذه الفصول بترتيب المقدار فهناك عدد متناه من الحدود وليكن ن قبل أى حد معلوم سيكون بذلك الحد النونى + ١ . وأهم من ذلك أن جميع المنطقات بل جميع الجذور الحقيقية للمعادلات ذات الدرجة المتناهية والمعادلات المنطقة (أى جميع الأعداد الجبرية) تكوّن متسلسلة معدودة[1] بل إن المتسلسلة النونية البعد لمثل هذه الحدود فهى أيضاً معدودة، سواء كانت متناهية أو كانت أصغر عدد ترتيبى متصاعد . أما أن الأعداد المنطقة معدودة فمن السهل تبين ذلك بوضعها فى ترتيب يكون تلك التى مجموع بسطها ومقامها أصغر قبل تلك التى مجموع بسطها ومقامها أكبر ، والتى مجموعها متساو والتى بسطها أصغر قبل التى بسطها أكبر . وبذلك نحصل على المتسلسلة :

$$١ ، \frac{١}{٢} ، ٢ ، \frac{١}{٣} ، ٣ ، \frac{١}{٤} ، \frac{٢}{٣} ، \frac{٣}{٢} ، ٤ ، \frac{١}{٥} \ldots\ldots\ldots\ldots$$

وهذه متسلسلة منفصلة لها بداية وليس لها نهاية . وكل عدد منطق يقع فى هذه المتسلسلة ويكون له عدد متناه من السوابق . أما فى الحالات الأخرى فالبرهان عسى أن يكون أصعب .

وجميع المتسلسلات المعدودة فلها عين العدد الأصلى ا. مهما يظهر أنها مختلفة . ولكن لا يجب افتراض عدم وجود عدد أكبر من ا. بالعكس توجد متسلسلة لا متناهية من مثل هذه الأعداد[2] . ويذهب كانتور إلى أن الأصليات المتصاعدة محكمة الترتيب ، أى تكون بحيث أن كل واحد منها ما عدا الأخير (إن كان هناك عدد أخير) فله تال مباشر ، وبذلك يكون كل فصل منها له أى أعداد مهما تكن بعد، ولكن ليس لها كلها سابق مباشر. مثال ذلك أن ا. نفسه ليس له

---

(١) انظر Acta Mathematica, 11, pp. 306, 313, 326.

(٢) Jahresbericht der dentschen Mathematiker - Vereinigung 1, 1892; Rivista di Matematica, 11, pp. 165-7.

أما ما يقوله كانتور من عدم وجود عدد أصلى متصاعد هو الأكبر فوضع مناقشة . انظر فيما بعد الباب الثالث والأربعين .

سابق مباشر ، إذ لو كان له سابق لكان آخر الأعداد المتناهية ، ونحن نعرف أنه ليس هناك عدد متناه أخير . ولكن الأسباب التى يعتمد عليها كانتور فى قوله إن الأصليات محكمة الترتيب يبدو أنها غير كافية ، ولذا يجب أن تظل هذه المسألة معروضة للبحث .

٢٨٨ ــ أهم الأعداد المتصاعدة خلاف $\aleph_0$ هو عدد المتواصل continuum ، وقد أثبت أن هذا العدد ليس $\aleph_0$ [١] ويأمل أن يبرهن أنه $\aleph_1$ [٢] ــ وهو أمل ولو أنه ظل يراوده زمناً إلا أنه لم يتحقق . وقد بين أن عدد المتواصل هو $2^{\aleph_0}$ [٣] ــ وهى نظرية فى غاية الغرابة . ولكن يجب أن يظل من المشكوك فيه هل هذا العدد هو $\aleph_1$ ، على الرغم من وجود أسباب لترجيح ذلك[٤]. أما عن تعريف $\aleph_1$ ، وجميع تتالى الأصليات المتصاعدة ، فهذه مسألة يحسن إرجاؤها إلى أن ننظر فى أمر الترتيبيات المتصاعدة . ويجب الآن نفترض أننا نستطيع الحصول على عدد أصلى متصاعد جديد بمجرد إضافة عدد واحد إليه ، أو حتى إضافة أى عدد متناه أو $\aleph_0$ ، بالعكس

---

(١) Acta Math. II. p. 308.

(٢) المرجع السابق ص ٤٠٤ ــ و $\aleph_1$ هو العدد المابعد $\aleph$.

(٣) Math. Annalen XLV: § 4 Note.

(٤) والسبب الذى ذهب إليه كانتور فى جعله القوة الثانية متطابقة مع المتواصل هو أن كل مجموعة خطية من النقط اللامتناهية فلها إما القوة الأولى وإما قوة المتواصل ، ومن ههنا يظهر أن قوة المتواصل لابد أن تكون الما بعد الأولى .

(Math. Annalen, 23. p. 488. See also Acta Math. VII). ولكن يظهر أن هذا الاستنتاج مزعزع بعض الشئ . واعتبر مثلا المثال الآتى : فى متوالية ملتحمة يتكون الامتداد المحدد بحدين إما من عدد من الحدود لامتناه ، وإما من حد واحد فقط حين ينطبق الحدان . ولا يتكون أبداً عدد متناه من الحدود أكثر من واحد . ولكن الامتدادات المتناهية تقدمها أصناف أخرى من المتسلسلات ، مثال ذلك المتواليات .

أما النظرية القائلة بأن عدد المتواصل هو $2^{\aleph_0}$ فتنتج ببساطة عن القضية المذكورة فى الباب ٣٤ وهى أن الفصول اللامتناهية للأعداد الصحيحة المتناهية تكون متسلسلة متصلة . وعدد جميع فصول الأعداد الصحيحة المتناهية هو $2^{\aleph_0}$ (انظر ما سبق) وعدد الفصول المتناهية هو $\aleph_0$ إذن عدد جميع الفصول اللامتناهية للأعداد الصحيحة المتناهية هو $2^{\aleph_0}$ لأن طرح $\aleph_0$ لا يسقط أى عدد أكبر من $\aleph_0$ ، وإذن $2^{\aleph_0}$ هو عدد المتواصل . ولكى نبرهن على أن هذا العدد هو $\aleph_1$ يكفى أن نبين أن عدد الفصول اللامتناهية للأعداد الصحيحة المتناهية هو عين عدد أصناف المتسلسلات التى يمكن أن تتكون من جميع الأعداد الصحيحة المتناهية . وسنرى فى الباب التالى أن هذا العدد الأخير هو $\aleph_1$.

مثل هذه الأسلحة الصغيرة لن تزعج الأصليات المتصاعدة ، إذ من المعروف أنه فى حالة ا ، وبعض فصول الأصليات المتصاعدة ، أن العدد يكون مساوياً لضعفه ؛ وكذلك فى حالة ا وربما فى فصل مختلف عن الأصليات المتصاعدة أن العدد يكون مساوياً لمربعه . فمجموع عددين تابعين للفصل الأول من هذين الفصلين يساوى أكبر العددين . وليس من المعروف هل جميع الأصليات المتصاعدة تتبع أو لا تتبع أحد هذين الفصلين أو كليهما .

٢٨٩ — وقد نتساءل : على أى وجه تكون كلا الأصليات المتناهية والمتصاعدة متسلسلة مفردة ؟ أليست متسلسلة الأعداد المتناهية تامة بذاتها بدون إمكان مد علاقتها المولدة؟ فإذا عرّفنا متسلسلة الأعداء الصحيحة بواسطة العلاقة المولدة للاختلاف بواحد — وهى الطريقة الطبيعية أكثر إذا شئنا اعتبار المتسلسلة كمتوالية — إذن لا بد من الاعتراف بأن الأعداد الصحيحة المتناهية تكوّن متسلسلة تامة ، وليس هناك إمكان لإضافة حدود لها . أما إذا اعتبرنا المتسلسلة — كما هو المناسب فى نظرية الأصليات — بأنها ناشئة من ترابط الكل بالجزء فى الفصول التى يمكن للأعداد الصحيحة الدخول فيها ، فسنرى عندئذ أن هذه العلاقة تمتد بالفعل إلى ما وراء الأعداد المتناهية . فهناك عدد لامتناه من الفصول اللامتناهية التى تتضمن أى فصل متناه معلوم ، الذى يسبق عدده بالترابط مع تلك الفصول عدد أى فصل من الفصول اللامتناهية . ولا أستطيع أن أحكم هل يوجد أى معنى آخر بمقتضاه تكوّن الأعدادُ الصحيحة متناهية ومتصاعدة متسلسلة مفردة. ويكفى المعنى المذكور سابقاً لبيان عدم وجود أى خطأ منطقى فى اعتبارها متسلسلة مفردة، إذا عرفنا أن أحد عددين أصليين لا بد أن يكون هو الأكبر منهما . وقد حان الآن الوقت للنظر فى أمر الترتيبيات المتصاعدة .

الترتيبيات المتصاعدة

٢٩٠ ــ الترتيبيات المتصاعدة إن أمكن بحثها أكثر فائدة وأهمية من الأصليات المتصاعدة ، لأنها على العكس من هذه لا تخضع لقانون التبادل ، ولذلك كان حسابها مختلفاً تماماً عن الحساب الابتدائى . ولكل عدد أصلى متصاعد ، أو على أقل تقدير لأى عدد فى فصل معين ، يوجد مجموعة لامتناهية من الترتيبات المتصاعدة ، ولو أن العدد الأصلى لجميع الترتيبات هو عين عدد جميع الأصليات أو أقل منه . والترتيبيات المنتمية لمتسلسلة عددها الأصلى هو $\aleph_0$ تسمى الفصل الثانى للترتيبيات . والتى تناظر $\aleph_1$ تسمى الفصل الثالث ، وهكذا . والأعداد الترتيبية هى أساساً فصول متسلسلات ، أو الأجدر أنها فصول علاقات مولدة للمتسلسلات . وهى تعرف فى الأغلب بعلاقة ما مع الاستنباط الرياضى . وكذلك الترتيبيات المتناهية يمكن أن تفهم على أنها أصناف من المتسلسلات : مثال ذلك العدد الترتيبى ν يمكن أن يؤخذ على أنه يعنى « علاقة متسلسلة لنون من الحدود » ، أو بلغة دارجة ν من الحدود فى صف row . وهذه فكرة ترتيبية متميزة عن « النونية » ، ومتقدمة منطقياً عليها[1] . وبهذا المعنى ν اسم لفصل من العلاقات المتسلسلة . وهذا هو المعنى ، لا ذلك المعبر عنه « بالنونى » ، الذى عممه كانتور لينطبق على المتسلسلات اللامتناهية .

٢٩١ ــ ولنبدأ بتعريف كانتور للفصل الثانى من الأعداد الترتيبية[2] ، الذى يقول فيه : « نستطيع الآن أن نبين كيف انتهينا إلى تعاريف الأعداد الجديدة ، وبأى الطرق نحصل على المقاطع الطبيعية ، التى أسميها « فصول الأعداد » ، فى المتسلسلات اللانهائية على الإطلاق للأعداد الصحيحة الحقيقية . . . . . . فالمتسلسلة (١) الخاصة بالأعداد الحقيقية الصحيحة الموجبة ١ ، ٢ ، ٣ . . . . . . ٧ . . .

---

(١) انظر ما سبق الجزء الرابع الباب الرابع والعشرين . ٢٣١ ، ٢٣٢ .

(٢) Mannichfaltigkeitslehre, § 11, pp. 32, 33

. . . . . . تنشأ من تكرار وضع وتركيب وحدات مفروضة من قبل ، ومعتبرة على أنها متساوية . والعدد ν (النون اليونانية) يعبر بالسوية على جملة Anzahl(amount) متناهية معينة لمثل هذه الأوضاع المتتالية ، وعلى تركيب الوحدات الموضوعة فى كل . وهكذا فإن تكوين الأعداد الحقيقية الصحيحة المتناهية يعتمد على جمع وحدة مع عدد كان قد تكون من قبل : وسأسمى هذه المرحلة التى سنرى فوراً أنها تلعب كذلك دوراً أساسياً فى تكوين الأعداد الصحيحة الأعلى ، « المبدأ للتكوين » . وجملة (Anzahl) الأعداد الممكنة ν فى الفصل(١) فهى لامتناهية ، ولا يوجد عدد هو الأكبر بينها . إذن على الرغم من أنه من التناقض القول بوجود أكبر عدد فى الفصل (١) ، إلا أنه لا اعتراض على تصور عدد جديد ، سنسميه ω يدل على أن كل المجموعة (١) معطاة بواسطة قانونها بترتيب تتاليها الطبيعى . (بنفس الطريقة التى تدل بها ν على تركيب جملة متناهية معينة من الوحدات فى كل) . بل من الجائز أن ننظر إلى العدد الجديد المخترع ω على أنه نهاية تتجه إليها أعداد ν ، إذا كنا لن نفهم من هذا شيئاً آخر سوى أن ω هو أول عدد صحيح يتبع جميع الأعداد ν ، أى أنه يسمى أكبر من كل عدد من أعداد ν . وبالسماح بإضافات أخرى من الوحدات تتبع وضع العدد ω فإننا نحصل بمعونة المبدأ « الأول » للتكوين على الأعداد الآتية :

$\omega + 1$ ، $\omega + 2$ . . . . $\omega + \nu$ . . . .

وحيث أننا لا نبلغ ههنا أى عدد هو الأكبر ، فإننا نتصور عدداً جديداً يمكن أن نسميه ٢ ω ، ويكون هو الأول بعد جميع الأعداد السابقة ν ، $\omega + \nu$.

« والدالة المنطقية التى أعطت لنا العددين ω ، ٢ ω من الواضح أنها تختلف عن المبدأ الأول للتكوين ، وأنا أسميها « المبدأ الثانى لتكوين » الأعداد الصحيحة الحقيقية ، وأعرفها بعبارة أضبط بما يلى : إذا وجد أى تتال محدود من الأعداد الصحيحة الحقيقة المعرَّفة ليس بينها أى عدد هو الأكبر ، أمكن إيجاد عدد جديد بواسطة هذا المبدأ الثانى للتكوين ، ويعتبر هذا العدد « نهاية » تلك الأعداد : أى يعرَّف بأنه العدد الأكبر الذى يأتى بعدها جميعاً » .

ويمكن أن نجعل مبدأى التكوين أوضح إذا اعتبرنا أن العدد الترتيبى إنما هو مجرد صنف أو فصل من متسلسلات ، أو بالأحرى من علاقاتها المولدة . فإذا وجدت متسلسلة ليس لها حد أخير ، فكل جزء من مثل هذه المتسلسلة والذى يمكن تعريفه بأنه جميع الحدود الداخلة فى المتسلسلة بما فيها حد مَّا من المتسلسلة ، سيكون له حد أخير . ولكن لما كانت المتسلسلة ذاتها ليس لها حد أخير ، فهى من صنف مختلف عن أى جزء من مثل هذه الأجزاء ، أى عن أى قطعة من ذاتها . وإذن لا بد أن يكون العدد الترتيبى الذى يمثل المتسلسلة ككل مختلفاً عن العدد الترتيبى الذى يمثل أى قطعة من ذاتها ، ولا بد أن يكون عدداً له سابق مباشر ما دامت المتسلسلة ليس لها حد أخير . وهكذا الرمز ω إن هو إلا مجرد اسم لفصل « المتوالية » ، أو للعلاقات المولدة لمتسلسلات هذا الفصل . والمبدأ الثانى للتكوين هو باختصار ذلك الذى به نعرف صنفاً معيناً من المتسلسلات ليس لها حد أخير . فإذا اعتبرنا الترتيبيات السابقة على أى عدد ترتيبى α نحصل عليه من المبدأ الثانى باعتبار أنه يمثل قطعاً من متسلسلة تمثلها α ، فالعدد الترتيبى نفسه α يمثل نهاية مثل هذه القطع . والقطع كما رأينا من قبل لها دائماً نهاية (بشرط ألا يكون لها نهاية عليا) حتى حين لا يكون للمتسلسلة الأصلية أيه نهاية[١] .

ولكى يعرف كانتور فصلا من الترتيبيات المتصاعدة (ويكون تتاليه لامتناهياً كما هو واضح) يدخل ما يسميه بمبدأ التناهى (Hemmungsprincip) principle of limitation. وطبقاً لهذا المبدأ يتألف « الفصل الثانى » فقط من الأعداد التى سوابقها من ١ إلى فوق تكون متسلسلة من القوة الأولى ، أى متسلسلة عددها الأصلى هو ا ، أو متسلسلة لحدودها بترتيب مناسب علاقة واحد بواحد مع الأعداد الصحيحة المتناهية . وعندئذ يتبين أن قوة الفصل الثانى أو العدد الأصلى للترتيبيات ككل

---

(١) انظر فيما يختص بقطع المتسلسلات المحكمة الترتيب مقالة كانتور Cantor, in Math. Annalen, XLIX, § 13. ومن المهم ملاحظة أن الترتيبات التى شرحناها فى المتن شبيهة فى تكوينها بالأعداد الحقيقية معتبرة كالقطع (انظر ما سبق الباب الثالث والثلاثين) . وكما رأينا هناك ، هنا أيضاً وجود ليس عرضة للمناقشة حين نصطنع نظرية القطع ، على حين أنه فى أى نظرية أخرى نجد أن النظرية الوجودية لا تقبل البرهنة وغير مقبولة

(٢) Mannichfaltigkeitslehre, p. 34.

مختلفة عن ا. (ص ٢٥) وهو العدد الأصلى الذى يأتى مباشرة بعد ا. (ص ٣٧) . ومعنى العدد الأصلى بعد ا. ينتج بوضوح من القضية الآتية (ص٣٨) « إذا كانت م أى مجموعة جيدة التعريف لقوة الفصل الثانى من الأعداد ، وإذا أخذت قطعة portion لامتناهية مَ من م، إذن إما أن المجموعة مَ، تعتبر كمجرد متسلسلة لامتناهية، وإما أن يقام تناظر فريد ومنعكس بين م ، مَ » . وبعبارة أخرى أى جزء من مجموعة من القوة الثانية فهو إما متناه ، أو من القوة الأولى ، أو من القوة الثانية ، وإذن فلا قوة بين الأولى والثانية .

٢٩٢ ــ قبل أن نشرع فى بحث جمع الترتيبيات وضربها ، إلخ ، يحسن أن نجرد القضايا السابقة بقدر الإمكان من ثوبها الرياضى ، وأن نصوغ بالضبط معناها فى لغة عادية . أما فيما يختص بالرمز الترتيبى ω فهذا ببساطة اسم لفصل العلاقات المولدة للمتواليات . وقد رأينا كيف تعرف المتوالية : فهى متسلسلة لها حد أول ، وحد يقع مباشرة بعد كل حد ، وتخضع للاستنباط الرياضى . لأننا يمكن أن نبين بالاستنباط الرياضى نفسه أن كل جزء من المتوالية إن كان لها حد أخير فلها عدد ترتيبى متناه ما ν حيث ν تدل على فصل المتسلسلة المتكونة من ν من الحدود بترتيب معين . على حين أن كل جزء ليس له حد أخير فهو نفسه متوالية . وكذلك نستطيع أن نبين (مما هو واضح حقاً) أنه لا ترتيبى متناه يمثل متوالية . ولكن المتواليات فصل معرف تماماً من المتسلسلات، ويبين مبدأ التجريد وجود شىء مّا لها جميعاً معه علاقة لا تقوم مع أى شىء آخر ــ لأن جميع المتواليات متشابهة ترتيبياً (أى لها علاقة واحد بواحد بحيث تترابط الحدود المتقدمة مع الحدود المتقدمة والحدود المتأخرة مع الحدود المتأخرة) . والتشابه الترتيبى متماثل متعد وهو بين المتسلسلات منعكس . هذا الشىء الذى يبينه مبدأ التجريد ، قد يؤخذ على أنه صنف أو فصل العلاقات المتسلسلة ما دامت أى متسلسلة لا يمكن أن تنتمى إلى أكثر من صنف واحد من المتسلسلات . فالصنف الذى تنتمى إليه المتواليات هو الذى يسميه كانتور ω . ولا يمكن للاستنباط الرياضى إذا بدأ من أى ترتيبى متناه أن يبلغ ω ، ما دامت ω ليست عضواً فى فصل الترتيبيات المتناهية. حقاً قد نعرّف الترتيبيات أو الأصليات المتناهية ــ وإذا كنا بصدد المتسلسلات

فيبدو أن هذا أفضل تعريف – بأنها تلك التى إذا بدأت من ٠ أو ١ فيمكن أن نبلغها بالاستنباط الرياضى . هذا المبدأ لا ينبغى من أجل ذلك أن يؤخذ على أنه بديهية أو مسلمة بل على أنه تعريف التناهى finitude ويجب ملاحظة أنه بمقتضى هذا المبدأ القائل بأن كل عدد فله تال مباشر ، يمكننا إثبات أن أى عدد معلوم ، وليكن ١٠,٩٣٧ فهو عدد متناه – بشرط أن يكون العدد المعلوم هو طبعاً عدد متناه . بعبارة أخرى كل قضية لها صلة بالعدد ١٠,٩٣٧ فيمكن إثباتها دون استخدام الاستنباط الر ياضى الذى كما يذكر معظمنا لم يكن له ذكر فى الحساب الذى استخدمناه فى طفولتنا . ليس ثمة إذن أى خطأ منطقى فى استخدام المبدأ كتعريف لفصل الأعداد المتناهية ، كما لا يوجد أى سبب لافتراض أن المبدأ ينطبق على « جميع » الأعداد الترتيبة أو على « جميع » الأعداد الأصلية .

وإذْ قد بلغنا هذه النقطة من الحديث فلعل كلمة نوجهها للفلاسفة تكون مناسبة للمقام . فمعظمهم فيما يبدو يفترضون أن التمييز بين المتناهى واللامتناهى من المعانى الواضحة مباشرة ، ويفكرون فى الموضوع كما لو أنهم كانوا فى غير حاجة إلى تعاريف دقيقة . ولكن الواقع يدل على أن التمييز بين المتناهى واللامتناهى ليس بأى شكل يسيراً ، ولم يكشف عنه الستار إلا بواسطة الرياضيين المحدثين . فالعددان ٠ ، ١ يخضعان للتعريف المنطقى ،ويمكن أن يبين منطقياً أن كل عدد فله تال ، عندئذ نستطيع أن نعرف الأعداد المتناهية إما بهذه الحقيقة من أن الاستنباط الرياضى يمكن أن يبلغها بادئة من ٠ أو ١ – أو بلغة ديديكند أنها تكوّن سلسلة الصفر أو الواحد – أو بهذه الحقيقة من أنها أعداد مجموعات ليس لأى جزء صحيح منها نفس العدد كالكل . ومن السهل أن نبين أن هذين الشرطين متكافئان ، ولكنهما وحدهما هما اللذان يميزان بالدقة المتناهى واللامتناهى ، وأى مناقشة للانهاية تغفلهما فلا بد أن تكون متهافتة .

٢٩٣ – أما بالنسبة لأعداد الفصل الثانى غير ω ، فيمكن أن نبدى الملاحظة الآتية . المجموعة المكونة من حدين أو أكثر فهى دائماً مجال لأكثر من علاقة متسلسلة واحدة ، إلا فيما يحتمل بالنسبة لبعض المجموعات اللانهائية الكبيرة جداً . فالناس يمكن أن يرتبوا بحسب منازلهم أو أعمارهم أو ثرواتهم أو حروفهم الأبجدية :

وجميع هذه العلاقات بين الناس تولد متسلسلات كل منها يضع البشرية فى ترتيب مختلف . ولكن حين تكون المجموعة متناهية ، فإن جميع التراتيب الممكنة تعطى عدداً ترتيبياً واحداً بعينه ، هو ذلك الذى يناظر العدد الأصلى للمجموعة . بعبارة أخرى جميع المتسلسلات التى يمكن أن تتكوّن من عدد معين متناه من الحدود فهى متشابهة ترتيبيا . أما بالنسبة للمتسلسلات اللامتناهية فالأمر مختلف تماماً . فالمجموعة اللامتناهية من الحدود التى لها القدرة على تراتيب مختلفة قد تنتمى بتراتيبها المختلفة لأصناف مختلفة تماماً . وقد رأينا من قبل أن المنطقات تكوّن فى ترتيب معين متسلسلة ملتحمة لاأول لها ولا آخر ، وتكوّن فى ترتيب آخر متوالية . فهذه متسلسلات من أصناف مختلفة بالكلية ، ويشمل هذا الإمكان جميع المتسلسلات اللامتناهية . والصنف الترتيبى لمتسلسلة لا يتغير بتبادل حدين متعاقبين ، ولا يتغير تبعاً لذلك بفضل الاستنباط الرياضى بأى عدد متناه من مثل هذه التبادلات . والمبدأ العام هو أن صنف المتسلسلة لا يتغير بما قد نسميه «بالتبديل» permutation . أى أنه إذا كانت ف علاقة متسلسلة بها ترتب حدود ى ، وكانت ع علاقة واحد بواحد ى ميدانها وعكس ميدانها معاً ، إذن عَ ف ع علاقة متسلسلة من نفس الصنف مثل ف . وجميع العلاقات المتسلسلة التى مجالها ى ، والتى هى من نفس الصنف مثل ف ، فهى من الصورة المذكورة ع ف ع . ولكن الصنف مع إعادة ترتيبه إعادة لا تقبل الرد إلى التباديل فإنه بوجه عام يتغير . خذ مثلا الأعداد الطبيعية أولا بترتيبها الطبيعى ، ثم بالترتيب الذى تقع فيه ٢ أولا ، ثم جميع الأعداد الأعلى بترتيبها الطبيعى ، وآخر كل شىء ١ : فى الترتيب الأول تكون الأعداد الطبيعية متوالية : وفى الثانى تكوّن متوالية مع حد أخير . أما فى الصورة الثانية فلم يعد الاستنباط الرياضى ينطبق ، إذ هناك قضايا تصح على العدد ٢ وعن كل عدد متناه تابع له ، ولكنها لا تصح على العدد ١ . والصورة الأولى هى صنف أى متسلسلة أساسية من النوع الذى بحثناه فى الباب الرابع والثلاثين . والصورة الثانية هى صنف أى متسلسلة من مثل هده المتسلسلات مأخوذة مع نهايتها . وقد بين كانتور أن كل مجموعة معدودة فيمكن أن تعطى ترتيباً يناظر أى عدد ترتيبى معين من الفصل الثانى[1].

---

(١) Acta Math. II, p. 394.

بناء على ذلك يمكن تعريف الفصل الثانى من الأعداد الترتيبية بأنه جميع أصناف المتسلسلات المحكمة الترتيب التى يمكن أن يرتب فيها أى مجموعة واحدة معدودة معلومة بواسطة علاقات مولدة مختلفة . ويعتمد إمكان مثل هذه الأصناف المختلفة على الخاصة الأساسية للمجموعات اللامتناهية من أن الجزء اللامتناهى لمجموعة لامتناهية يمكن دائماً أن يوجد ويكون له ترابط واحد بواحد مع الكل . فإذا كانت المجموعة الأصلية متسلسلة أصبح الجزء بهذا الترابط متسلسلة شبيهة ترتيبيا بالكل . أما الحدود الباقية فإذا أضيفت بعد جميع حدود الجزء اللامتناهى فإنها تجعل الكل عندئذ مختلفاً ترتيبيا عما كان عليه[١] .

ويمكن أن نماثل بين نظرية الترتيبيات وبين نظرية الأصليات بما يأتى : يقال إن علاقتين شبيهتان like إذا كان هناك علاقة واحد بواحد ل ميدانها مجال واحدة منهما (ق) وتكون بحيث أن العلاقة الأخرى هى لّ ق ل . فإذا كانت ق علاقة محكمة الترتيب ، أى علاقة تولد متسلسلة محكمة الترتيب ، أمكن أن يعرّف فصل العلاقات الشبيه بـ ق بأنه العدد الترتيبى لـ ق . إذن الأعداد الترتيبية تنتج من الشبه likeness بين العلاقات كما تنتج الأصليات من التشابه Similarity بين الفصول .

٢٩٤ ـ نستطيع الآن أن نفهم قواعد جمع الترييبيات المتصاعدة وضربها . وكلا عمليتى الجمع والضرب يخضعان لقانون الترتيب ، ولكنهما لا يخضعان لقانون التبادل . وقانون التوزيع صحيح بوجه عام ولكن فى صورة .

حـ (ا + ب) = حـ ا + حـ ب

حيث ا + ب ، ا ، ب هى المضروب فيها[٢] . أما أن الجمع لا يخضع لقانون التبادل فمن السهل تبين ذلك . خذ مثلا ω + ١ ، ١ + ω ، فالأولى تدل على

---

(١) الحدود الباقية إذا كان عددها متناهياً فالغالب أنها لن تغير الصنف إذا أضيفت عند البداية ، أما إذا كانت لا متناهية فإنها تغيره حتى عند البداية . وسنشرح هذا شرحاً أوفى بعد قليل .

(١) Mannichfaltigkeitslehre, p. 39. – هذا و ا + ب ستكون صنف المتسلسلة التى تتكون من جزأين هما جز من الصنف ا متبوع بجزء من الصنف ب وستكون جـ ا صنف المتسلسلة التى تتكون من الصنف ا من متسلسلة الصنف جـ . وهكذا فإن المتسلسلة المكونة من متواليتين فهى من الصنف $\omega \times ٢$

متوالية متبوعة بحد مفرد، وهذا هو الصنف الذى تعرضه متوالية مع نهايتها، وهذه تختلف عن المتوالية البسيطة . وعلى ذلك ω + ١ ترتيبيا مختلفة عن ω . أما ١ +ω فإنها تدل على متوالية مسبوقة بحد مفرد، وهذه أيضاً متوالية . وعلى ذلك ١ + ω = ω ، ولكن ١ + ω لا تساوى ω + ١ [١] . الواقع أن أعداد الفصل الثانى من نوعين (١) أعداد لها سابق مباشر ، (٢) أعداد ليس لها أى سابق . فالأعداد من مثل ω ، ω × ٢ ، ω × ٣ ، . . . . ، $\omega^{٢}$ . . . . ω^{ω} . . . . فليس لها أى سابق مباشر . وإذا أضيف أى عدد من هذه الأعداد إلى عدد متناه ، لظهر نفس العدد المتصاعد ولكن إذا جمع أى عدد متناه مع أى عدد من هذه الأعداد لحصلنا على عدد جديد . والأعداد التى هى بغير سابق تمثل متسلسلات ليس لها طرف ، أما التى لها سابق فإنها تمثل متسلسلات لها طرف . ومن الواضح أن الحدود التى تجمع فى أول متسلسلة لا طرف لها ، فإنها تترك المتسلسلة بلا طرف ، ولكن جمع متسلسلة منتهية terminating على متسلسلة لا أول لها ولا آخر ، فإنها تنتج متسلسلة منتهية، وإذن صنف جديد من الترتيب . وبذلك ليس ثمة أى غموض حول هذه القواعد من الجمع التى إنما تدل على صنف المتسلسلة الناجمة من تركيب متسلسلتين معلومتين.

ومن ثم من السهل الحصول على قواعد الطرح [١]. فإذا كانت ا أصغر من ب كانت المعادلة ا + س = ب لها دائماً حل واحد لا غير فى س تمثله : ب — ا . وهذا يعطينا صنف المتسلسلة التى لا بد من جمعها بعد الحصول على ب .

ولكن المعادلة س+ ا = ب لن يكون لها أحياناً حل، وفى بعض الأحيان الأخرى عدد لامتناه من الحلول . فالمعادلة س + ω = ω + ١ ليس لها حل ألبتة : إذ لا عدد من الحدود يجمع فى أول متوالية سينتج متوالية مع حد أخير .

الواقع فى المعادلة س + ا = ب إذا كانت ا تمثل صنفاً لا طرف له ، بينما ب تمثل صنفاً منتهياً بطرف ، فمن الواضح بما فيه الكفاية أن الحدود التى تجمع

---

(١) Math. Annalen XLVI, § 8.

(٢) Mannichfaltigkeitslehre, p. 39

قبل ا لن تنتج أبداً صنفاً منتهياً بطرف ، ولا يمكن إذن البتة أن تنتج الصنف ب .
ومن جهة أخرى إذا اعتبرنا المعادلة .

$$س + \omega = \omega + ٢$$

وجدنا أنها تتحقق بالمعادلة س = ω + ى حيث ى هو الصفر أو أى عدد متناه . لأن ى قبل ω الثانية ستلتحم معها لتكوّن ω ، وبذلك تكون ω + ى + ω = ω × ٢ ، وفى هذه الحالة عندئذ س يكون له عدد لامتناه من القيم . ومع ذلك فى جميع مثل هذه الأحوال قيم س الممكنة لها حد أصغر هو ضرب من القيمة الرئيسية للفرق بين ب ، ا . وبذلك يكون الطرح على نوعين بحسب ما نبحث عن عدد إذا جمع على ا أعطى ب ، أو عن عدد يجمع ا عليه بحيث يعطى ب . وفى الحالة الأولى يوجد دائماً حل وحيد ، بشرط أن تكون ا أصغر من ب . وفى الحالة الثانية ربما لا يكون هناك حل ، وربما كان هناك عدد لا نهاية له من الحلول .

٢٩٥ — يعرّف ضرب الترتيبيات كالآتى[١] : ليكن م ، ى متسلسلة من الصنفين ا ، ب . وبدلا من كل عنصر ى فى ى ، ضع متسلسلة $م_ى$ من الصنف ا وليكن ل المتسلسلة المتكونة من جميع حدود جميع متسلسلات $م_ى$ مأخوذة بالترتيب الآتى : (١) أى عنصرين فى ل منتميان لنفس المتسلسلة $م_ى$ فتحتفظ بالترتيب الذى كان لها فى $م_ى$ ؛ العنصران المنتميان لمتسلسلتين مختلفتين $م_ى$ ، $م_{ى'}$ فلهما الترتيب الذى كان لـ ى ، ى' فى ى . إذن الصنف ل إنما يعتمد فقط على ا ، ب ، ويعرف بأنه حاصل ضربهما ا ب ، حيث ا هو المضروب ، ب هو المضروب فيه .
ومن السهل أن نتبين أن حواصل الضرب لا تخضع دائماً لقانون التبادل . مثال ذلك ٢ × ω هى صنف المتسلسلة التى تقدمها

$$هـ_١ ، و_١ ؛ هـ_٢ ، و_٢ ؛ هـ_٣ ، و_٣ ؛ \ldots \ldots هـ_ى ، و_ى ؛ \ldots \ldots$$

وهذه متوالية ، بحيث أن ٢ × ω = ω . ولكن ω × ٢ هى الصنف الذى تقدمه

$$هـ_١ ، هـ_٢ ، هـ_٣ ، \ldots \ldots هـ_ى ، \ldots \ldots ؛ و_١ ، و_٢ ، و_٣ ، \ldots \ldots و_ى$$

(١ Math. Annalen, XLVI, * 8.

وهذا تركيب من متواليتين لا من متوالية واحدة . فى المتسلسلة الأولى لا يوجد إلا حد واحد فقط ليس له سابق مباشر هو هـ١ . وفى المتسلسلة الثانية يوجد حدان هما هـ١ ، و١ .

وينبغى تمييز نوعين فى القسمة كما فعلنا فى الطرح[١]. فإذا وجد ثلاثة ترتيبيات ا ، ب ، حـ بحيث إن ب = ا حـ فإن المعادلة ب × ا س ليس لها حل آخر سوى س = حـ ، ويمكن عندئذ أن ندل على حـ بقولنا $\frac{ب}{ا}$[٢]. ولكن المعادلة ب = س ا إذا قبلت الحل أصلا فربما كان لها عدة جذور إن لم يكن لها عدد لا نهاية له من الجذور ، أحدها مع ذلك يكون دائماً الأصغر . وهذا الجذر الأصغر ندل عليه بقولنا $\frac{ب}{ا}$.

وضرب الترتيبيات هى العملية التى بها نمثل متسلسلة متسلسلات على أنها متسلسلة مفردة ، من حيث إننا نأخذ كل متسلسلة ككل مع الاحتفاظ بموضعها فى متسلسلة المتسلسلات . ومن جهة أخرى القسمة هى العملية التى بها نجزىء متسلسلة مفردة إلى متسلسلة متسلسلات دون أن نغير ترتيب حدودها . ولهاتين العمليتين بعض الأهمية فيما يختص بالأبعاد . والقسمة كما هو واضح إنما تكون ممكنة بالنسبة لبعض أصناف المتسلسلات . أما تلك التى لا تكون فيها ممكنة فقد تسمى أولية prime . ونظرية الأعداد الأولية شائقة ولكن ليس من الضرورى أن نخوض فى بحثها[٣] .

٢٩٦ ـ كل عدد صحيح منطق أو دالة أسية لـ ω فهو عدد من الفصل الثانى حتى حين تقع أمثال هذه الأعداد ω^{-} ، $\omega^{-٢}$ ، إلخ[٤]. ولكن لا ينبغى افتراض أن جميع أصناف المتسلسلات المعدودة تقبل مثل هذه الصورة . مثال ذلك الصنف η الذى يمثل المنطقات بترتيب المقدار[٥] فإنه عاجز بالكلية عن التعبير بحدود ω

(١) Mannichfaltigkeitslehre, p. 40.

(٢) غير كانتور اصطلاحه الرمزى بالنسبة للضرب ، فكان أولا يدل على ا × ب بأن ا المضروب فيه ، ب المضروب ، ولكنه الآن أخذ بالترتيب المتقابل . وقد بدلت الترتيب إلى المأخوذ به الآن عند النقل عن مؤلفاته القديمة ، فيما عدا النصوص الحالية .

(٣) انظر Mannichfaltigkeitslehre, p. 40

(٤) انظر فيما يختص بالدولة الأسية Math. Annalen, XLVI, § 9

(٥) Math. Annalen, XLIX, §§ 18—80.

وكانتور لا يسمى مثل هذا الصنف « عدداً » ترتيبيا ، إذ يحتفظ باصطلاح « العدد الترتيبى » للمتسلسلة « المحكمة الترتيب » . أى التى بحيث يكون لها الخاصتان الآتيتان[1].

١ ــ يوجد فى المتسلسلة ف حد أول .

٢ ــ إذا كانت فَ جزءاً من ف ، وكانت ف حاصلة على حد واحد أو أكثر تأتى بعد جميع حدود فَ ، إذن هناك حد نَ من ف يتبع مباشرة فَ ، بحيث لا يكون هناك أى حد من ف قبل نَ وبعد جميع حدود فَ .

وجميع الدوال الممكنة لـ ω وللترتيبيات المتناهية إنما تمثل فقط متسلسلات محكمة الترتيب ، باستثناء أصناف أخرى مثل أصناف المنطقات ، ولو أن العكس لا يصح . فى كل متسلسلة محكمة الترتيب يوجد حد يأتى بعد أى حد معلوم ، باستثناء الحد الأخير إن وجد . وإذا كانت المتسلسلة لامتناهية فإنها تشتمل دائماً على أجزاء هى متواليات . والحد الذى يأتى ما بعد متوالية فليس له سابق مباشر ؛ وصنف القطعة المكونة من سوابقها هى مما يسمى النوع الثانى . والحدود الأخرى فلها سوابق مباشرة ، وأصناف قطعها المكونة من سوابقها يقال إنها من النوع الأول .

٢٩٧ ــ النظر فى المتسلسلات غير المحكمة الترتيب هام ، ولو أن نتائجه أقل صلة بالحساب من حالة المتسلسلة المحكمة الترتيب . وعلى ذلك فالصنف η لا يعبر عنه كدالة ω ما دامت جميع دوال ω تمثل متسلسلات لها حد أول ، بينما η ليس له حد أول ، وجميع دوال ω تمثل متسلسلات كل حد فيها له تال مباشر ، وليست هذه هى الحال فى η . بل إن متسلسلة الأعداد الصحيحة الموجبة والسالبة والصفر فلا يمكن التعبير عنها بحدود ω ، ما دامت هذه المتسلسلة ليس لها بداية . ويعرف كانتور لهذا الغرض الصنف المتسلسل $^*\omega$ ــ الذى قد يؤخذ على أنه « متراجعة » (المرجع السابق بند ٧) وتعريف المتوالية كما رأينا ذو صلة بعلاقة ما واحد بواحد غريبة

---

(١) Math. Annalen, XLIX, § 12 . ويمكن أن نضع بدل هذا التعريف التعريف الآتى وهو مكافىء له : تكون المتسلسلة محكمة الترتيب إذا كان لكل فصل تحتويه المتسلسلة حد أول (باستثناء الفصل الصفرى طبعاً) .

هى ق ه[1] . فحين تُوَلِّدُ ق ه متوالية تكون هذه المتوالية بالنسبة لـ ق ه aliorelative متراجعة بالنسبة لـ ق ه ، وصنفها باعتبار أنه متولد بواسطة ق ه يرمز له بالرمز ω^* . وهكذا فإن كل متسلسلة الأعداد الصحيحة الموجبة والسالبة فهى من الصنف $\omega^* + \omega$. ومثل هذه المتسلسلة يمكن قسمتها حيثما كانت إلى متواليتين متولدتين بعلاقات عكسية . ولكن بالنسبة لعلاقة واحدة فلا يمكن أن ترد المتسلسلة لأى تركيب من متواليات . مثل هذه المتسلسلة تعرَّف تعريفاً تاماً بالطرق المذكورة فى الجزء الرابع كما يأتى : ف علاقة واحد بواحد غريبة ، ومجال ق ه متطابق مع مجال قّ ه ؛ وعلاقة الانفصال وهى « قوة ما موجبة متناهية لـ ق ه » فهى متعدية ولا متماثلة ؛ وتكوِّن المتسلسلة من جميع الحدود التى لها هذه العلاقة أو عكسها مع حد معلوم مأخوذةً مع هذا الحد المعلوم . وبذلك فإن فصل المتسلسلات المناظر لأى صنف ترتيبى متصاعد يمكن دائماً أن يعرف بالطرق المذكورة فى الجزء الرابع . ولكن حيث لا يمكن التعبير عن الصنف كدالة ω أو ω^* أو هما معاً ، فسيكون من الضرورى عادة ، إنْ وجب أن نعرف صنفنا تعريفاً تامًّا ، إما أن ندخل صلة بعلاقة أخرى مما تكوِّن حدودُ متسلسلتنا بالنسبة لها متوالية ، وإما أن نخصص مسلك متسلسلتنا بالنسبة للنهايات . وهكذا فإن صنف متسلسلة المنطقات لا يعرف بتخصيصه بأنه ملتحم ، وليس له أول أو آخر . وهذا التعريف ينطبق كذلك مثلا على ما يسميه كانتور ، شبه المتواصل ، أى المتواصل المنقطع عند طرفيه . ويجب أن نضيف إلى ذلك أن المنطقات معدودة ، أى أنها بالنسبة لعلاقة أخرى تكون متوالية . وإنى أشك فى هذه الحالة إذا كان مسلك المنطقات بالنسبة للنهايات مما يمكن استخدامه فى التعريف . وأهم خصائصها فى هذا الصدد هى (١) أنها متكثفة فى ذاتها ، أى كل حد منها فهو نهاية متواليات ومتراجعات معينة . (٢) فى أى فترة ففيها متوالية أو متراجعة ليس لها نهاية . ولكن كلا هاتين الخاصتين تنتميان إلى متسلسلة الأعداد اللامنطقة ، أى إلى المتسلسلة التى نحصل عليها بحذف جميع المنطقات من متسلسلة الأعداد الحقيقية ، ومع ذلك فهذه المتسلسلة ليست معدودة . وهكذا يبدو أننا لا نستطيع أن نعرف الصنف η الذى تنتمى إليه المنطقات بغير إشارة

---

(١) العلاقة الغريبة علاقة ليست لأى حد مع نفسه . ويرجع وضع هذا الاصطلاح إلى بيرس . انظر Schroder, Algebra u. Logik der Relative. p. 131.

إلى علاقتين مولدتين . والصنف η هو صنف المتسلسلة الملتحمة التى لا طرف لها والتى تكون حدودها بالصلة مع علاقة أخرى متوالية .

ونتبين بوضوح من الملاحظة الأخيرة أهمية ترابط المتسلسلات الذى بدأنا به المناقشات فى الجزء الخامس . لأنه إنما يمكن فقط بواسطة الترابط أن يعرّف صنف المنطقات وأن يعرّف حينئذ المتواصل . وإلى أن نهتدى إلى علاقة ما أخرى غير تلك التى بها ينشأ ترتيب المقدار بين المنطقات ، فلا يوجد شىء به نميز صنف المنطقات من صنف اللامنطقات .

٢٩٨ ـ البحث فى الترتيبيات التى لا تقبل التعبير كدوال ω يبين بوضوح أن الترتيبيات بوجه عام لا بد أن تعتبر ـ كما اقترحت فى بداية هذا الباب ـ كفصول أو أصناف لعلاقات متسلسلة ، ومن الظاهر أن كانتور نفسه يتمسك الآن بهذه الوجهة من النظر ، إذ فى المقالة التى نشرها فى Mathematiche Annalen Vol. XLVI يتحدث عنها دائماً كأصناف من الترتيب لا كأعداد ، وفى المقالة التى تليها (Math. Annalen, XLIX, § 12) يقصر بلانزاع الأعداد الترتيبية على المتسلسلا ت المحكمة الترتيب . وفى كتاباته الأولى كان ينحاز أكثر إلى دوال ω التى لها شبه كثير بأنواع الأعداد المألوفة ، فهذه فى الواقع أصناف من الترتيب يمكن أن تقدمها متسلسلات من الأصليات المتناهية والمتصاعدة التى تبدأ بعدد أصلى مّا . غير أن بعض الأصناف الأخرى من الترتيب لها كما رأينا الآن شبهاً قليلا جدّاً بالأعداد .

٢٩٩ ـ ويجدر بنا إعادة تعاريف الأفكار العامة التى نحن بصددها فى صيغة ما يمكن تسميته بحساب العلاقة[1] . إذا كانت ق ، ك علاقتين بحيث يكون هناك علاقة واحد بواحد ل ميدانها ق بحيث أن ك = لˇ ق ل ، إذن ق ، ك يقال إنهما « شبيهان » . وفصل العلاقات الشبيه بـ ق ، والذى أدل عليه بالرمز λ ق يسمى عدد علاقة ق . فإذا لم يكن لمجالى ق ، ك حدود مشتركة ، يعرف ق + ك بأنه ق أو ك أو العلاقة التى تقوم بين أى حد من مجال ق وأى حد من مجال ك ، ولا تقوم بين أى حدود أخرى . وهكذا فإن ق + ك لا تساوى ك + ق . وأيضاً

---

(١) انظر الجزء الرابع الباب الرابع والعشرين الفقرة ٢٣١ .

$ـه_\gamma + ك_\gamma$ تعرف بأنها $_\gamma($ ـه + ك) . وللحصول على مجموع summation عدد لا متناه من العلاقات نحتاج إلى علاقة غريبة مجالها مركب من علاقات مجالاتها متباعدة فيما بينها. وليكن ق مثل هذه العلاقة وليكن ن مجالها بحيث يكون ـه فصل علاقات. إذن ح ن ق تدل إما على علاقة من علاقات الفصل ـه أو علاقة أى حد ينتمى لمجال علاقة ما ك من الفصل ن مع حد ينتمى لمجال علاقة أخرى ع (من الفصل ـه) له مع ك العلاقة ق . (إذا كانت ق علاقة متسلسلة ، ق فصل علاقات متسلسلة ، كانت ح ن ق العلاقة المولدة لمجموع المتسلسلات المتعددة المتولدة من حدود ق مأخوذة بالترتيب المتولد من ق) . وقد نعرف مجموع أعداد علاقة الحدود المتعددة ا ـه بأنه عدد علاقة ح ن ق . فإذا كانت جميع حدود ق لها نفس عدد العلاقة ، وليكن ا ، وكانت ب عدد علاقة ق ، فإن ا × ب تعرف بأنها عدد علاقة ح ن ق . فإذا سرنا فى هذا الطريق كان من السهل إثبات بوجه عام القوانين الثلاثة الصورية التى تنطبق على المتسلسلات المحكمة الترتيب وهى :

(ا + ب) + حـ = ا + (ب + حـ)

ا (ب + حـ) = ا ب + ا حـ

(ا ب) حـ = ا (ب حـ)

والبراهين شديدة الشبه بما اكتشفه الأستاذ هوايتهيد خاصا بالأعداد الأصلية (Amer. Journal of Math. Vol. XXIV) ولكنها تختلف فى أن أحداً لم يكتشف بعد طريقة لتعريف حاصل الضرب اللانهائى لأعداد العلاقة أو حتى للأعداد الترتيبية .

٣٠٠ — ينبغى ملاحظة أن مزية الطريقة السالفة هو أنها لا تفسح المجال لأى شك فى النظريات الوجودية — وهى نقطة أغفلت مباحث كانتور فيها شيئاً يحتاج إلى إيضاح. ولما كان هذا الأمر على جانب كبير من الأهمية ويقف فيه الفلاسفة موقف الشك . سأعيد ههنا الحجة مرة أخرى بوجه عام . ولنبدأ بقولنا إنه من الممكن بيان أنه لا فصل متناه يحيط بجميع الحدود : وينتج ذلك بقليل من الالتفات عن هذه الحقيقة وهى أنه ما دام ٠ عدداً أصلياً ، فعدد الأعداد منه إلى ن بما فيه ن هو ن + ١ . ثم إذا كان ن عدداً متناهياً ، كان ن + ١ عدداً

جديداً متناهياً مبايناً لجميع سوابقه . وبذلك تكون الأصليات المتناهية متوالية ، وحينئذ يوجد العدد الترتيبى ω والعدد الأصلى ا$_0$ (بالمعنى الرياضى) . وعندئذ نحصل بمجرد إعادة ترتيب متسلسلة الأصليات المتناهية على جميع الترتيبيات من الفصل الثانى لكانتور . ويمكن الآن تعريف العدد الترتيبى ω_1 بأنه فصل العلاقات المتسلسلة بحيث إذا كان ى فصلا يحتويه مجال أحد تلك الفصول ، فالقول بأن ى له توال يستلزم القول ويلزم عن القول بأن ى له ا$_0$ من الحدود أو عدد متناه من الحدود . ومن السهل بيان أن متسلسلة الترتيبيات من الفصلين الأول والثانى بترتيب المقدار هى من هذا الصنف. وبناء على ذلك يقوم البرهان على وجود ω_1 ؛ ويعرف ا$_1$ بأنه عدد الحدود فى متسلسلة علاقتها المولدة من الصنف ω_1 . ومن ثم نستطيع أن نتقدم نحو ω_2 ، ا$_2$ ، بل إلى ω_{-} ، ا$_{-}$ ، ووجودهما يمكن البرهنة عليه بالمثل : بأن ω_{-} هو صنف العلاقة المولدة لمتسلسلة بحيث إذا كان ى فصلا تحتويه المتسلسلة فالقول بأن ى له توال successors. يكافئ القول بأن ى متناه أو له ا ه من الحدود بفرض قيمة مناسبة متناهية لـ ه. وهذه العملية تعطينا ترابط واحد بواحد بين الترتيبيات والأصليات . ومن الواضح أننا ببسط العملية نستطيع أن نجعل كل عدد أصلى يمكن أن ينتمى لمتسلسلة محكمة الترتيب يناظر عدداً ترتيبياً واحداً غير . ويفترض كانتور كبديهية أن كل فصل فهو مجال متسلسلة ما محكمة الترتيب ، ويستنتج أن « جميع » الأصليات يمكن أن ترتبط بالترتيبيات بالطريقة المذكورة . ويلوح لى أن هذا الافتراض لا أساس له وبخاصة بالنسبة لهذه الحقيقة وهى أن أحداً لم ينجح بعد فى ترتيب فصل الحدود ٢ ا$_0$ فى متسلسلة محكمة الترتيب. ولسنا نعرف أنه إذا علم أى عددين أصليين مختلفين فلا بد أن يكون أحدهما الأكبر ، وربما لم يكن ٢ ا$_0$ أكبر ولا أصغر من ا$_1$ ، ا$_2$ وتواليهما وهى التى يمكن أن تسمى أصليات محكمة الترتيب ، لأنها تنطبق على فصول محكمة الترتيب .

٣٠١ ـ وثمة صعوبة بالنسبة لصنف كافة متسلسلة الأعداد الترتيبية فمن السهل إثبات أن كل قطعة من هذه المتسلسلة محكمة الترتيب ، ومن الطبيعى افتراض أن المتسلسلة كلها محكمة الترتيب أيضاً . فإذا كان الأمر كذلك وجب أن يكون صنفها أكبر جميع الأعداد الترتيبية ، لأن الترتيبيات الأصغر من ترتيبى معلوم تكون بترتيب المقدار متسلسلة صنفها هو الترتيبى المعلوم . ولكن لا يمكن أن يكون هناك عدد ترتيبى هو الأكبر لأن كل عدد ترتيبى يزيد بإضافة ١ . وقد استدل

بورالى فورتى من هذا التناقض الذى اكتشفه[١] على أن عددين ترتيبيين، وكما هى الحال فى عددين أصليين، إذا كانا مختلفين فليس من الضرورى أن يكون أحدهما الأكبر والآخر الأصغر. وهو فى هذه المسألة يعارض عن وعى إحدى نظريات كانتور التى تثبت العكس[٢]. وقد فحصت هذه النظرية بغاية ما أمكننى من العناية فعجزت عن تبين أى خلل فى البرهان[٣] وفى برهان بورالى فورتى مقدمة أخرى يلوح لى أنها أدعى للإنكار، وهى أن متسلسلة جميع الأعداد الترتيبية محكمة الترتيب، فهذا لا يلزم عن القول بأن جميع قطعها محكمة الترتيب، ولا بد فى رأيى أن ترفض ما دامت فيما أعلم قاصرة عن البرهنة. وبهذا السبيل يلوح أن التناقض المذكور يمكن تجنبه.

٣٠٢ ــ نستطيع الآن أن نرجع إلى موضوع المشتقات المتتالية لمتسلسلة مما قد ناقشناه فى إيجاز فى الباب السادس والثلاثين. ويكوّن هذا الموضوع أحد التطبيقات الشديدة الطرافة لتلك الترتيبيات التى هى دوال ω، بل ربما يستخدم كطريقة مستقلة لتعريفها. وقد رأينا من قبل كيف نحصل على أول مشتقة من متسلسلة ن[٤]. فأول مشتقة من ن والذى نعطيه الرمز ن' هو فصل نقطها النهائية. ويتكون ن'' وهو المشتقة الثانية من ن' من النقط النهائية لـ ن'، وهكذا. ولكل مجموعة لا متناهية نقطة نهاية واحدة على الأقل: مثال ذلك ω هو نهاية الترتيبيات المتناهية. ويمكن أن نعرف بالاستنباط أى مشتقة من الترتيب المتناهى لـ ن ν. إذا كان ن ν متكوناً من عدد متناه من النقط، فإن ن ν+1 يتلاشى. وإذا حدث ذلك لأى عدد متناه ν، قيل إن ن من الجنس الأول ومن النوع النونى. ولكن قد يحصل ألا يتلاشى ن ν، وفى هذه الحالة ربما يكون لجميع

---

(١) "Una Questioni sui numeri transfiniti," Rendiconti del circolo Matematico di Palermo, Vol. XI (1897).

(٢) النظرية N فى الفقرة ١٣ من مقالة كانتور فى مجلة Math, Annalen, V8l, XLIX,

(٣) لقد أعدت البرهان فى صورة رمزية حيث يمكن الكشف بسهولة عن الأخطاء فى مجلة R d M, Vol. VIII, Prop. 5. 47.

(٤) الكلام المذكور فيما بعد مقتبس من Acta Math. 11, pp. 341 - 360. وسأفترض للتبسيط أن كل نهايات قابلة للتعريف فهى موجودة، أى يكون للمتسلسلة نهاية كلما كان للقطع المناظرة نهاية. وقد بينت فى الباب السادس والثلاثين كيف تقرر النتائج بحيث نتجنب هذا الافتراض، ولكن الإطناب الضرورى لذلك ممل.

المشتقات المتناهية نقط مشتركة. والنقط التي لها جميعاً باشتراك تكوّن مجموعة تعرف بأنها ق ﷲ . وينبغي ملاحظة أن ق ﷲ تعرَّف على هذا النحو دون حاجة إلى تعريف ω. وينتمي الحد س إلى ق ﷲ إذا كان س منتمياً ا ق ن بفرض أن ن أي عدد صحيح متناه . وينبغي ملاحظة أنه مع أن ق ﷲ قد تشتمل على نقط لا تنتمي ا ق ، إلا أن المشتقات التابعة لا تدخل نقطاً جديدة . وهذا يوضح الطبيعة الخالقة لطريقة النهايات أو بالأحرى القطع ، وهي حين تطبق أولا ربما أنتجت حدوداً جديدة ، ولكن التطبيقات المتأخرة لا تعطي حدوداً أخرى . ومعنى ذلك أن هناك فرقاً ذاتيّاً بين متسلسلة حصلنا عليها أو ربما كنا قد حصلنا عليها كمشتقة من متسلسلة ما أخرى ، وبين متسلسلة لم نحصل عليها بهذه الطريقة . وكل متسلسلة تحتوى أول مشتقة لها فهي نفسها مشتقة من عدد لا متناه من متسلسلات أخرى[١] . والمشتقات المتتالية كالقطع المحددة بواسطة الحدود المتعددة المتراجعة ، تكوّن متسلسلة كل حد فيها جزء من كل سابق من سابقاتها . وعلى ذلك ق ﷲ إنْ وجدت هي النهاية الدنيا لجميع مشتقات الترتيب المتناهي . ومن السهل أن نصعد من ق إلى ق ﷲ+ن ، ق ﷲ٢ ، إلخ. ويمكن تركيب متسلسلات بالفعل أول ما يتلاشى فيها هو أي مشتقة معينة ، متناهية كانت أو متصاعدة من الفصل الثاني . فإذا لم تتلاش أي مشتقة من المشتقات المتناهية يقال إنَّ ق من الجنس الثاني . ومع ذلك لا ينبغي أن نستنتج من ذلك أن ق غير معدودة ، بالعكس أول مشتقة من المنطقات هو المتواصل العددي number-continuum وهو بسبب أنه كامل فإن جميع مشتقاته متطابقة مع نفسها. ومع ذلك فالمنطقات كما نعرف معدودة ، ولكن حين تتلاشى ق ن تكون ق دائماً معدودة إذا كانت ن متناهية أو من الفصل الثاني .

نظرية المشتقات عظيمة الأهمية بالنسبة لنظرية الدوال الحقيقية[٢] ، حيث

---

(١) Formulaire de Mathématique, Vol. II, Part III, § 71, 4 - 8

(١) انظر Dini, Theorie der Functionen, Leipzig, 1892. وبخاصة الباب الثالث عشر ومقدمة المترجم .

تمكننا عمليـًا من تطبيق الاستنباط الرياضى على أى ترتيبى من الفصل الثانى . ولكنها بالنسبة للفلسفة يلوح أنه ليس من الضرورى أن نبسط القول أكثر مما ذكرناه فى الملاحظات السابقة وفى الباب السادس والثلاثين . ويمكن القول بلغة دارجة إن أول مشتقة تتكون من جميع النقط يتراكم فى جوارها عدد لامتناه من حدود المجموعة . وهكذا من السهل أن نتبين لم كانت المشتقات لها بالمتواصل مدخل : فالمجموعة لكى تكون متصلة لا بد أن تكون مركزة ما أمكن فى كل جوار يحتوى أى حدود من المجموعة . ولكن مثل هذه الضروب الدارجة من التعبير تقصر عن الدقة الموجودة فى اصطلاحات كانتور .

الباب التاسع والثلاثون

الحساب اللانهائى الصغر

٣٠٣ ـ الحساب اللانهائى الصغر هو الاسم التقليدى لحساب التفاضل والتكامل معاً ، ومن حيث هو كذلك فقد احتفظت به ، على الرغم مما سيتبين لنا بعد قليل أنه لا توجد أى إشارة إلى اللانهائى الصغر ، أو أى لزوم عنه فى أى جزء من هذا الفرع من الرياضيات . أحيطت النظرية الفلسفية للحساب التحليلى منذ اختراع هذا الموضوع بظروف تكاد تكون مشينة بعض الشىء . فهذا ليبنتز نفسه ـ ومن المفروض أنه كان يجب أن يكون أكفأ من يعطى رأياً صحيحاً عن اختراعه ـ كانت له أفكار عن هذا الموضوع لا يمكن أن توصف إلا بأنها فجة إلى أقصى حد . ويلوح أنه ذهب إلى أننا إذا اطرحنا جانباً دقائق الميتافيزيقا ، فإنما يكون الحساب التحليلى تقريبيًّا فقط ، ولكنه يبرر من الناحية العملية بأن الأخطاء التى تنشأ عنه أقل من أخطاء الملاحظة[١] . وعند ما كان يفكر فى الديناميكا ، عاقه اعتقاده فى اللانهائى الصغر بالفعل من اكتشاف أن الحساب التحليلى يعتمد على مذهب النهايات ، وجعله لا يعتبر ءس ، ءص كأنهما صفر ، أو متناهيان ، أو أوهام رياضية ، بل على أنهما يمثلان الوحدات التى كان من المفروض فى فلسفته أن تؤدى إليها القسمة اللامتناهية[٢] . وفى عرضه الرياضى للموضوع تجنب إعطاء براهين دقيقة مكتفياً بسرد القواعد[٣] . حقًّا إنه ينكر فى أوقات أخرى اللانهائيات الصغر أن تكون صحيحة فلسفيًّا[٤] ، ولكنه فشل فى بيان كيف تكون النتائج الحاصلة بواسطة الحساب التحليلى مضبوطة لا تقريبية

---

(١) Mathematical Works, Gerhardt's ed. IV, 10 p. 91 — 93 Phil. Works. Gerhardt's ed. 11, p. 282.

(٢) Math. Works, Gerhardt's ed. VI, pp. 235, 247, 252

(٣) Math. Works, Gerhardt's ed. Vol. V, pp. 220 8. 6.

(٤) انظر مثلا Phil. Works, Gerhardt's ed. II, p. 305 وانظر Cassirer, *Leibriz's Syotem* (Marburg, 1902) pp. 206—7.

بدون استخدام اللانهائيات الصغر . ونيوتن فى هذا الصدد أفضل من ليبنتز[١]، لأن مأخوذاته تعطى الأساس الصحيح ؟ للحساب التحليلى فى مذهب النهايات ، وبفرض اتصال المكان والزمان بالمعنى الكانتورى ، فإنها تعطى أدلة صحيحة على قواعدها بمقدار ما يتصل بالمقادير الزمكانية . غير أن نيوتن كان بطبيعة الحال جاهلا تماماً بهذه الحقيقة وهى أن مأخوذاته تعتمد على النظرية الحديثة للاتصال . وفضلا عن ذلك فإن الرجوع إلى الزمان والتغير وهو الذى يظهر فى لفظة الفرق fluxion ، وإلى المكان الذى يظهر فى المأخوذات ، كان غير ضرورى بالكلية . وإنما أفاد فقط فى إخفاء الواقع من أنه لا تعريف للاتصال كان قد أعطى . ويبدو من المشكوك فيه جداً أن ليبنتز تجنب هذا الخطأ ، وعلى كل حال من المؤكد أنه فيما نشره لأول مرة عن الحساب التحليلى عرف معامل التفاضل بواسطة مماس المنحنى . وكان تأكيده جانب اللانهائى الصغر سبباً فى إساءة توجيه النظر إلى الحساب التحليلى مما أدى إلى تضليل جميع الرياضيين قبل فيرشتراس (وربما باستثناء ديمورجان) وجميع الفلاسفة إلى وقتنا الحاضر . ولم يتسن للرياضيين إلا منذ ثلاثين أو أربعين عاماً أن يضعوا الأسس اللازمة لفلسفة الحساب التحليلى . وهذه الأسس ليست كما هو الطبيعى معروفة إلا قليلا بين الفلاسفة وفيما عدا الفرنسيين[٢] . أما المؤلفات الفلسفية عن الموضوع مثل كتاب Cohen, Princip der Infinitesi r.al methode und seine Geschichte [٣] فهى مشوبة فيما يختص بالنظرية التركيبية بضرب من الغموض الموروث عن كانط ، والذى يؤدى إلى نتائج كالتطابق بين مفهوم المقدار وبين ما صدقات اللانهائى الصغر[٤]. وسأفحص فى الباب المقبل مفهوم اللانهائى الصغر مما يعد ضرورياً لجميع النظريات الفلسفية المنشورة حتى الآن عن الحساب التحليلى . أما الذى يعنينى الآن فهو تقديم النظرية التركيبية بحسب استنتاجهامن الرياضيات الحديثة .

---

(١) Principia, Part I, Section I.

(٢) انظر Couturat, De l'Infini Mathématique, passim

(٣) Berlin, 1883. وينبغى ان نقول إن الجانب التاريخى فى مؤلفه رائع .

(٤) المرجع السابق ص ١٥ .

٣٠٤ ـ يعتمد معامل التفاضل أساساً على فكرة دالة متصلة لمتغير متصل . وإذا أردنا تعريف هذه الفكرة وجدنا أنها ليست ترتيبية بحتة ؛ بالعكس إنها تنطبق أولا على متسلسلة الأعداد فقط ، ثم بعد ذلك تبسط لتشمل المتسلسلات التي تكون فيها المسافات أو الامتدادات قابلة للقياس عددياً . ولكن علينا قبل كل شئ أن نعرّف الدالة المتصلة .

رأينا من قبل (الباب الثانى والثلاثين) ما المقصود بدالة المتغير ، وما المقصود بالمتغير المتصل (الباب السادس والثلاثين) . إذا كانت الدالة أحادية القيمة ، وكانت مرتبة فقط بالترابط مع المتغير فعندئذ لا معنى للسؤال عن الدالة أهى متصلة حين يكون المتغير متصلا ، لأن مثل هذه المتسلسلة الموجودة بالترابط تكون دائماً متشابهة ترتيبياً بنموذجها الأصلى . أما حين يكون للدالة ترتيب مستقل عن الترابط ، كما هو الحال عند ما يكون كلا المتغير ومجال الدالة فصلين من الأعداد ، فربما يحدث وربما لا يحدث أن تكون قيمُ الدالة بالترتيب الحاصل عن الترابط متسلسلة متصلة بالترتيب المستقل . فإذا فعلت قيم الدالة ذلك فى أى فترة قيل إن الدالة متصلة فى تلك الفترة . ويعطى دينى Dini تعريفين دقيقين للدالتين المتصلة والمنفصلة حيث يكون كلا س ، د (س) عدديتين بما يأتى : المتغير المستقل س يعتبر مكوّناً من الأعداد الحقيقية ، أو من جميع الأعداد الحقيقية فى فترة معينة . وبذلك د (س) فى الفترة المعينة تكون أحادية القيمة حتى فى نقط أطراف الفترة ، وتكون أيضاً مركبة من أعداد حقيقية . وعندئذ نحصل على التعريفين الآتيين من حيث أن الدالة تعرف للفترة بين α ، β حيث ا عدد حقيقى ما فى هذه الفترة .

« نسمى د (س) « متصلة » للقيمة س = ا ، أو فى النقطة ا التى يكون لها القيمة د (ا) ، إذا وجد لكل عدد موجب σ مختلف عن ٠ ولكنه يبلغ من الصغر ما شئنا ، عدد موجب ϵ مختلف عن ٠ ، بحيث يكون الفرق د (ا + δ) ــ د (ا) أصغر عددياً من σ ، لجميع قيم δ الأصغر عددياً من ϵ . بعبارة أخرى د (س) تكون متصلة عند النقطة س = ا حيث يكون لها القيمة د (ا) إذا

(١) المرجع السابق ، الفقرة ٣٠ ، ص ٥٠ ، ٥١

كانت نهاية قيمها عن يمين ا هى ذاتها نهاية قيمها عن شمال ا وكان كل منهما يساوى د (ا) » .

« د (س) تسمى « منفصلة » لقيمة س = ا إذا لم يوجد لأى[١] قيمة موجبة لـ σ قيمة مناظرة موجبة لـ ε ، بحيث أنه لجميع قيم δ الأصغر عدديًّا من ε ، د (ا + δ) – د (ا) يكون دائماً أصغر من σ . بعبارة أخرى د (س) تكون منفصلة لقيمة س = ا عند ما تكون قيم د (ا + هـ) للدالة د (س) على يمين ا ، وقيم د (ا – هـ) للدالة د (س) على شمال ا ، ليس لكل منهما نهاية محدودة ، أو إذا كان لهما مثل هذه النهاية فهما مختلفان على جانبى ا ؛ أو إذا كانا نفس النهاية اختلفا عن قيمة د (ا) التى تكون للدالة فى النقطة ا » .

هذان التعريفان لاتصال الدالة وانفصالها لا بد من الاعتراف أنهما معقدان بعض الشيء . ولكن يبدو من المستحيل إدخال أى تبسيط دون التضحية بالدقة . بعبارة دارجة يمكن القول إن الدالة تكون متصلة فى جوار ا عند ما تكون قيمتها كلما اقتربت من ا تقترب من قيمة د (ا) ، وتكون د (ا) نهاية هذه القيم على اليمين والشمال على السواء . ولكن فكرة نهاية الدالة فكرة أكثر تعقيداً من فكرة النهاية بوجه عام ، وهى تلك الفكرة التى كانت محل بحثنا حتى الآن . والدالة إذا كانت من نوع عام تماماً ، فلن يكون لها نهاية كلما اقتربت من نقطة معينة . ولكى يكون لها نهاية ، كلما اقتربت س من ا من الشمال ؛ فيجب ويكفى أنه إذا ذكر أى عدد ε ، فأى قيمتين لـ د (س) عند ما تكون س قريبة بما يكفى عن ا ولكنها أصغر من ا فالفرق بينهما أصغر من ε . وبلغة دارجة قيمة الدالة لا تحدث طفرات فجائية كلما اقتربت س من ا من الشمال . وتحت ظروف مشابهة د (س) تكون لها نهاية كلما اقتربت من ا من اليمين . ولكن هاتين النهايتين حتى إذا وجدا كلاهما فليس من الضرورى أن يكونا متساويتين فيما بينهما ، ولا مع د (ا) وهى قيمة الدالة عند ما تكون س = ا . ويمكن بذلك وضع الشرط الدقيق للنهاية المتناهية المحدودة[٢] :

---

(١) الألمان (لا الإيطاليون) يضعون « كل » every بدلا من « أى » any ، ولكن هذه غلطة قلم .
(٢) Dini – المرجع السابق ص ٣٨ .

« لكى يكون لقيم صـ على يمين أو شمال عدد متناه ا (وليكن على اليمين) نهاية متناهية محدودة يجب ويكفى أن يكون لكل عدد صغير موجب σ اخترناه حسب ما نشاء عدد موجب ϵ بحيث أن الفرق صـ$_{ا+\epsilon}$ — صـ$_{ا+\delta}$ بين قيمة صـ$_{ا+\epsilon}$ لصـ للقيمة س = ا$+\epsilon$ وبين قيمة صـ$_{ا+\delta}$ التى تناظر قيمة ا$+\delta$ لقيمة س ، يجب أن يكون أصغر عددياً من σ لكل δ أكبر من ٠ وأصغر من ϵ » .

ويجوز بدلا من تعريف نهاية الدالة ذلك التعريف ثم الشروع بعد ذلك فى مناقشة أمر وجودها ، أن نعرف بوجه عام فصلا بأسره من النهايات[1] . وفى هذه الطريقة ينتمى العدد ط لفصل نهايات صـ لقيمة س = ا ، إذا كانت صـ أقرب إلى ط من أى فرق معلوم ، وذلك داخل نطاق أى فترة تحتوى ا مهما تكن صغيرة . مثال ذلك أن جا $\frac{1}{س}$ كلما اقتربت س من الصفر ستأخذ جميع القيم من — ١ إلى + ١ (بما فيها — ١ ، + ١) فى كل فترة متناهية تحتوى الصفر مهما تكن صغيرة . وهكذا فإن الفترة من — ١ إلى + ١ تكون فى هذه الحالة فصل النهايات لقيمة س = ٠ ولهذه الطريقة مزية أن فصل النهايات يكون موجوداً أبداً . وعندئذ يسهل تعريف « النهاية » بأنها العضو الوحيد فى فصل النهايات فى حالة ما إذا كان هذا الفصل ليس له إلا عضو واحد فقط . ويلوح على الفور أن هذه الطريقة أبسط وأعم .

٣٠٥ — وحيث قد اتفقنا على معنى الدالة المتصلة ونهاية الدالة فقد نستطيع الخوض فى مسألة مشتقة الدالة أو المعامل التفاضلى . كان من المفروض سابقاً أن جميع الدوال المتصلة يمكن أن تفاضل ولكن اتضح الآن أن ذلك الرأى باطل . لأن بعضها يمكن أن تفاضل فى كل موضع ، وبعضها الآخر فى كل موضع إلا فى نقطة واحدة ، وأخرى تفاضل فى كل موضع على اليمين ولكن فى بعض الأحيان لا تفاضل على الشمال ، والبعض تحتوى عدداً لامتناهياً من النقط فى أى فترة متناهية لا يمكنها فيها أن تفاضل مع أن عدداً أكبر لا متناهياً من النقط يمكن فيها أن تفاضل ، والبعض أخيراً — وهذه فى الحقيقة هى أعم فصل — لا يمكن أن تفاضل

---

(١) انظر Peano, *Rivista di Matematica*, II, pp. 77 — 79; *Formulaire*, Part *III*, § 73, I. 0.

فى أى موضع ألبتة[1] . ولكن الشروط التى فيها يمكن أن تفاضل الدالة مع أنها على بعض الأهمية لفلسفة المكان والزمان إلا أنها لا تتطلب مناهها كبير عناية . وعلى كل حال لا بد لنا أولا أن نعرف ما التفاضل .

إذا كانت د (س) دالة متناهية ومتصلة فى النقطة س . عندئذ قد يحدث أن يكون الكسر .

$$\frac{د (س + \delta) - د (س)}{\delta}$$

له نهاية معينة كلما اقترب δ من الصفر . فإذا حدث ذلك رمزنا للنهاية بالرمز دَ (س)، وتقال إنها المشتقة أو تفاضل د (س) فى النقطة س . أى إذا وجد عدد ما ط بحيث إنه إذا علم أى عدد ء مهما صغر ، وكان δ أى عدد أصغر ولكنه موجب ، إذن $\frac{د (س \pm \delta) - د (س)}{\pm \delta}$ يختلف عن ط بأقل من ء ، وإذن ط هى مشتقة د (س) فى النقطة س . وإذا لم توجد النهاية المذكورة ، عندئذ د (س) ليس لها مشتقة عند النقطة س . فإذا لم تكن د (س) متصلة عند هذه النقطة ، فالنهاية لا توجد ، وإذا كانت د (س) متصلة فربما وجدت النهاية وربما لم توجد .

٣٠٦ – النقطة الوحيدة الجديرة بالملاحظة فى الوقت الحاضر هى أن هذا التعريف لا يلزم عنه اللانهائى الصغر . فالعدد δ دائماً متناه ، وليس فى تعريف النهاية ما يلزم عنه العكس . الواقع $\frac{د (س + \delta) - د (س)}{\delta}$ معتبراً كدالة δ فهو غير معين بالكلية عند $\delta = ٠$ ونهاية الدالة لقيمة معلومة للمتغير المستقل هى كما رأينا فكرة مختلفة تماماً عن قيمتها للقيمة المذكورة للمتغير المستقل ، والاثنتان ربما كانتا نفس العدد وربما لم تكونا . وفى الحالة الراهنة قد تكون النهاية معينة ، ولكن قيمتها عند $\delta = ٠$ لن يكون لها معنى . وعلى ذلك فإن مذهب النهايات هو الذى يقوم فى أساس الحساب التحليلى لا أى استخدام مزعوم للانهائى الصغر . وهذه هى النقطة الوحيدة ذات الأهمية الفلسفية فى الموضوع الراهن ، ولم أستدرج القارئ إلى هذا القدر الكبير من الرياضة إلا لتوضيح هذه النقطة .

(١) انظر Dini, op. cit. Chapters X, XI, XII, Encyclopedie der Math. Wissenschaften, Band II, Heft I, (Leipzig, 1899) cap. pp 20 — 22

٣٠٧ — قبل بحث اللانهائى الصغر لذاته يبقى علينا أن نعرف التكامل المعين ، وأن أبين أن هذا أيضاً لا يتطلب اللانهائى الصغر . أما التكامل غير المعين الذى هو مجرد عكس التفاضل ، فليس بذى أهمية عندنا ، ولكن التكامل المعين فله تعريف مستقل لا بد أن نفحصه بإيجاز ، فنقول :

كما أن مشتقة الدالة هو نهاية كسر ، كذلك التكامل المعين فهو نهاية مجموع [1] . ويمكن تعريف التكامل المعين بما يأتى : لتكن د (س) دالة أحادية القيمة ، ومتناهية فى الفترة من ا إلى ب (وكلاهما وداخلان) . اقسم هذه الفترة إلى أى ن من الأجزاء بواسطة (ن — ١) من النقط س١ ، س٢ ، ...... سن-١ وارمز بقولك δ_1 ، δ_2 ، ...... $\delta_ن$ على الفترات التى عددها ن وهى ، س١ - ا ، س٢ — س١ ، ...... ب — سن-١ . وفى كل فترة من هذه الفترات $\delta_ر$ ، خذ أى قيمة من القيم ولتكن د (ى ر) التى تأخذها د (س) فى هذه الفترة ، واضرب هذه القيمة فى الفترة $\delta_ر$. ثم استخرج مجموع $\sum^{ن}$ د (ى ر) $\delta_ر$ ، وسيكون هذا المجموع دائماً متناهياً . فإذا آل هذا المجموع كلما تزايدت ن إلى نهاية معينة ، مهما نختار د (ى ر) فى فترتها ، ومهما يكن اختيارنا للفترات (بشرط فقط أن تكون كلها أصغر من أى عدد معين لقيم ن الكبيرة كبراً كافياً) عندئذ تسمى هذه النهاية الواحدة بالتكامل المعين للدالة د (س) من ا إلى ب . فإذا لم توجد مثل هذه النهاية ، فإن د (س) ليست قابلة للتكامل من ا إلى ب .

٣٠٨ — ليس لنا إلا ملاحظة واحدة على هذا التعريف ، كما فعلنا فى حالة المشتقة . فالتكامل المعين لا يتطلب اللامتناهى ولا اللانهائى الصغر ، وليس هو نفسه مجموعاً ولكنه فقط بالضبط نهاية مجموع . وجميع الحدود التى تقع فى المجموع الذى نهايته التكامل المعين فهى متناهية ، والمجموع نفسه متناه . ولو افترضنا بلوغ النهاية بالفعل لصح أن يكون عدد الفترات لامتناهياً ، وأن يكون

---

(١) تعريف التكامل المعين يختلف بعض الشىء باختلاف المؤلفات الحديثة . انظر فى ذلك Dini, op. cit. * * 178 — 181; Jordan, *Cours d'Analyse* Vol. 1 (Paris 1893) Chap. 1 §§ 41 — 58. Encyklopedie der Mathematischen Wissenschaften II A 2 § 31 والتعريف بأنه نهاية مجموع أكثر توافقاً مع آراء ليبنتز من قولنا إنه عكس مشتقة ، وكان قد ألغاه برنولى وأويلر ثم أعاده كوشى — انظر آخر المراجع المشار إليها .

مقدار كل منها لا نهائياً فى الصغر. ولكن فى هذه الحالة يصبح المجموع ولا معنى له . على ذلك لا يجب أن نعتبر المجموع على أنه بالغٌ بالفعل نهايته . ولكن هذا الوجه هو من الوجوه التى تتفق فيها المتسلسلات عامة . وأى متسلسلة تصعد دائماً ، أو تهبط دائماً ، وليس لها حد أخير ، فلا يمكن أن تبلغ نهايتها . وبعض المتسلسلات الأخرى اللامتناهية « ربما » كان لها حد يساوى نهايتها ، ولكن إذا كان الأمر كذلك فهذا محض مصادفة . أما القاعدة العامة فهى أن النهاية لا تنتمى للمتسلسلة التى هى نهاية لها ، وفى تعريف المشتقة والتكامل المعين ، إنما نجد مثالا آخر على هذه الحقيقة . فما يسمى بالحساب اللانهائى الصغر إذن لا شأن له باللانهائى الصغر ، وله فقط مدخل بطريق غير مباشر فى اللامتناهى — وارتباطه باللامتناهى جاء من أنه يتضمن النهايات ، وأن المتسلسلات اللامتناهية وحدها لها نهايات .

التعاريف المذكورة ما دامت تستدعى الضرب والقسمة فهى حسابية أساساً ، وهى على خلاف تعاريف النهايات والاتصال لا يمكن أن تُجعل ترتيبية بحتة . ولكن من الواضح أنها قد تبسط فوراً لتشمل أى مقادير تقاس عددياً ، فتشمل عندئذ جميع المتسلسلات التى يمكن أن تقاس فيها الامتدادات أو المسافات . ولما كانت أنواع المكان والزمان والحركة داخلة تحت هذا العنوان ، فالحساب التحليلى ينطبق على الهندسة والديناميكا . أما عن البديهيات الداخلة فى الافتراض بأن الدوال الهندسية والدينامية يمكن أن تُفاضل وتكامل فسأتحدث عن ذلك فيما بعد . أما فى الوقت الحاضر فالوقت مناسب لإجراء فحص نقدى للانهائى الصغر لذاته .

الباب الأربعون

اللانهائى الصغر واللامتناهى المعتل

٣٠٩ – كان الاعتقاد عموماً حتى الزمن الحديث أن الاتصال والمشتقة والتكامل المعين تتطلب بالفعل كلها اللانهائيات الصغر ، أى أنه حتى إنْ أمكن تحرير تعاريف هذه المفاهيم صوريا من الذكر الصريح للانهائى الصغر ، إلا أنه حيث تطبق التعاريف فلا بد دائما أن يوجد اللانهائى الصغر بالفعل . وقد هُجر هذا الاعتقاد الآن بوجه عام . والتعاريف التى أعطيناها فى الأبواب السابقة لا تتضمن بأى حال اللانهائى الصغر ، ويلوح أن هذا المفهوم قد أصبح من الناحية الرياضية عديم الفائدة . وفى الباب الحاضر سأعطى أولا تعريف اللانهائى الصغر ، ثم أفحص الأحوال التى تنشأ فيها هذه الفكرة ، وأختم الباب بمناقشة نقدية للاعتقاد بأن الاتصال يستلزم اللانهائى الصغر .

كان تعريف اللانهائى الصغر بوجه عام غايةً فى الإبهام ، إذْ اعتبر بأنه عدد أو مقدار مع أنه ليس صفرا فهو أصغر من أى عدد أو مقدار متناه . فقد كانت ء س أو ء ص المستخدمتان فى الحساب التحليلى هى الزمن الذى تكون فيه كرة قذفت رأسيا إلى فوق ساكنة عند أعلى نقطة من مسيرها ، أو المسافة بين نقطة على خط وبين النقطة التالية ، إلخ، إلخ . ولكن ولا فكرة من هذه الأفكار مضبوطة على الإطلاق لأن ء س ، ء ص كما رأينا فى الباب السابق ليسا شيئا ألبتة ، لأن $\frac{ء ص}{ء س}$ نهاية كسر بسطه ومقامه متناهيان ، ولكن الكسر ليس فى ذاته كسرا ألبتة . أما الزمن الذى تكون فيه الكرة ساكنة فى أعلى نقطة فإنها فكرة معقدة جدا تتطلب النظرية الفلسفية كلها للحركة . وسنرى فى الجزء السابع من هذا الكتاب أنه لا يوجد مثل هذا الزمن بعد تقدم البحث فى هذه النظرية . والمسافة بين النقط المتعاقبة تفترض فى أساسها وجود نقط متعاقبة – وهو رأى يوجد ألف سبب لإنكاره . وكذلك الشأن فى معظم اللحظات – فإنها لاتعطى تعريفا دقيقا لما نعنيه باللانهائى الصغر .

٣١٠ – لا يوجد بمقدار ما أعلم سوى تعريف واحد مضبوط يجعل اللانهائى الصغر فكرة نسبية بحتة مترابطة مع شيء يؤخذ تحكميا بأنه متناه . أما حين نعتبر بدلا من ذلك ما أخذ بأنه اللانهائى الصغر متناهيا . فالفكرة المترابطة معه هى التى يسميها كانتور اللامتناهى المعتل (Uneigentlich-Unendlieches) . ونحصل على تعريف العلاقة المذكورة بإنكار بديهية أرشميدس . كما حصلنا على المتصاعد بإنكار الاستنباط الرياضى . فإذا كان ﻫ . ك أى عددين أو أى مقدارين قابلين للقياس ، قيل إنهما متناهيان كل منهما بالنسبة للآخر بفرض أن ﻫ الأصغر عندما يوجد عدد صحيح متناه ﻥ بحيث إن ﻥ ﻫ أكبر من ك . ووجود مثل هذا العدد الصحيح هو الذى يكون بديهية أرشميدس وتعريف التناهى النسبى . ويلاحظ أنه يفترض فى أساسه تعريف التناهى المطلق بين الأعداد – وهو تعريف يعتمد كما رأينا على نقطتين ، (١) ارتباط العدد ١ بالفكرة المنطقية عن البساطة ، أو ارتباط الصفر بالفكرة المنطقية للفصل الصفرى ؛ (٢) مبدأ الاستنباط الرياضى . ومن الواضح أن فكرة التناهى النسبى متميزة عن التناهى المطلق ، لأن الأخيرة إنما تنطبق فقط على الأعداد والفصول والانقسامات حيث أن الأولى تنطبق على أى مقدار قابل للقياس . وأى عددين أو فصلين أو انقسامين إذا كانا متناهيين بإطلاق فهما أيضا متناهيان نسبيا ، ولكن العكس غير صحيح . مثال ذلك ω ، ω × ٢ ؛ بوصة وقدم ؛ يوم وسنة . فهى أزواج متناهية نسبيا ، ولو أن جميع هذه الأزواج الثلاثة تتكون من حدود لامتناهية مطلقا .

يجرى إذن تعريف اللانهائى الصغر واللامتناهى المعتل improper على النحو الآتى : إذا كان ﻫ . ك عددين أو مقدارين قابلين للقياس من نفس النوع ، وإذا كان ﻥ أى عدد صحيح متناه شئنا وكان ﻥ ﻫ دائما أصغر من ك ، إذن ﻫ لانهائى الصغر بالنسبة إلى ك ، و ك متناه بالنسبة لـ ﻫ . وفيما يختص بالأعداد ليست هذه الحدود النسبية مطلوبة ، لأنه فى الحالة المفروضة إذا كان ﻫ متناهيا مطلقا ، إذن ك لا متناه مطلقا ؛ على حين أنه إن أمكن أن يكون ك متناهيا مطلقا ، لكان ﻫ لانهائى الصغر مطلقا – وهى حالة سنرى سببا لاستحالتها . وعلى ذلك سأفترض فى المستقبل أن ﻫ ، ك ليسا عددين ، ولكنهما مقداران من نوع بعضه على الأقل

يقبل القياس عدديا . وينبغي ملاحظة أنه بالنسبة للمقادير بديهية أرشميدس هى السبيل الوحيد لا لتعريف اللانهائى الصغر فقط ، بل اللامتناهى أيضا . وليس لدينا ما نقوله عن المقدار الذى لا يقبل القياس عدديا سوى أنه أكبر من بعض نوعه وأصغر من بعضه الآخر . ولكننا لا نستطيع أن نحصل على اللانهاية من مثل هذه القضايا . لأنه حتى إذا سلمنا بوجود مقدار أكبر من جميع المقادير الأخرى من نوعه ، فليس ثمة ما يدعو إلى اعتباره لامتناهيا . صفوة القول : التناهى واللانهاية فكرتان عدديتان أساساً ، وإنما بعلاقتهما بالأعداد فقط يمكن تطبيقهما على أمور أخرى .

٣١١ ــ السؤال الذى يلى ما سبقت مناقشته هو : أى حالات للانهائيات الصغر علينا أن نبحث عنها ؟ ومع أنّ الموجود من الحالات أقل جدا مما سبق لنا افتراضه ، إلا أنه لا يزال يوجد بعض الحالات الهامة . ولنبدأ بقولنا إننا إذا كنا على صواب فى اعتبار الانقسام divisibility مقداراً ، فمن الواضح أن انقسام أى كلٍ يحتوى عددا متناهيا من الأجزاء البسيطة. فهو لانهائى الصغر بمقارنته مع كلٍ آخر يحتوى عدداً لامتناهيا . فإذا أخذنا عدد الأجزاء كمقياس كان كلُ كلٍ لامتناه أكبر من كل كل متناه ن من المرات. مهما يكن عدد ن متناهيا . فهذه إذن حالة مثال واضح تماماً . ولكن لا يجب افتراض أن نسبة الانقسام فى كُلَّين أحدهما على الأقل متصاعد ، يمكن أن تقاس بواسطة نسبة العددين الأصليين لأجزائهما البسيطة . ويوجد سببان لتعليل العجز عن هذا الإمكان ، أولهما أنه لا يوجد لعددين أصليين متصاعدين أى علاقة شبيهة بالضبط بالنسبة . حقا تعريف النسبة يجرى بواسطة الاستنباط الرياضى . وعلاقة أصليين متصاعدين ا ، حـ المعبر عنها بالمعادلة ا ب = حـ تحمل فى طياتها شبها معينا بنسب الأعداد الصحيحة ، ويمكن استخدام ا ب = حـ ، لتعريف نسب أخرى . ولكن النسب المعرّفة على هذا النحو ليست شبيهة تماما بالنسب المتناهية . والسبب الثانى الذى من أجله لا يجب أن تقاس الانقسامات اللامتناهية بواسطة الأعداد الأصلية هو أن الكل يجب دائما أن يكون له من الانقسامات أكثر مما للجزء (بشرط ألا يكون الجزء الباقى لانهائى الصغر نسبيا) ، ولو أن الكل ربما كان له نفس العدد

المتصاعد . جملة القول : الانقسامات كالترتيبيات متساوية ما دامت الكلات متناهية عندما ، وعندما فقط ، تكون الأعداد الأصلية فى الكلات واحدة . ولكن فكرة مقدار الانقسام متميزة عن فكرة العدد الأصلى ، وتفترق عنها بوضوح عندما ننظر فى الكلات اللانهائية .

الكلان اللامتناهيان قد يكونان بحيث أن أحدهما أقل انقساماً إلى ما لا نهاية له من الآخر . خذ مثلا طول خط مستقيم متناه ، ومساحة المربع على الخط المستقيم ؛ أو طول خط مستقيم متناه وطول الخط المستقيم كله الذى هو جزء منه (باستثناء مسافات محدودة منه) ؛ أو مساحة وحجم ؛ أو الأعداد المنطقة والأعداد الحقيقية ؛ أو مجموعة نقط على جزء متناه من خط حاصل بطريقة فون شتاوت لرسم الشكل الرباعى quadrilateral construction. وكافة مجموعة النقط على الجزء المتناهى المذكور[1] . فهذه كلها مقادير من نوع واحد بالذات هو الانقسامات ، وكلها انقسامات لا متناهية ، ولكنها من مراتب كثيرة مختلفة . فالنقط على جزء محدود من خط حاصل بطريقة رسم الشكل الرباعى تكون مجموعة لانهائية الصغر بالنسبة إلى الجزء المذكور ؛ وهذا الجزء لانهائى الصغر ترتيبيا[2] بالإضافة لأى مساحة محوطة بحدود ؛ وأى مساحة من هذا النوع فهى لانهائية الصغر ترتيبيا بالنسبة لأى حجم محدود ؛ وأى حجم محدود (باستثناء فراغات متناهية) لانهائى الصغر ترتيبيا بالنسبة لكل الفراغ . وفى جميع هذه الحالات تستخدم لفظة « لانهائى الصغر » بدقة حسب التعريف المذكور الحاصل من بديهية أرشميدس . أما ما يجعل هذه اللانهائيات الصغر غير مهمة بعض الشىء من الناحية الرياضية فهو أن القياس يعتمد أساساً على بديهية أرشميدس ، ولا يمكن بوجه عام أن يمتد بواسطة الأعداد المتصاعدة للأسباب التى شرحناها من قبل . وعلى ذلك يُعتبر عادة الانقسامان اللذان يكون أحدهما لانهائى الصغر بالنسبة للآخر نوعين مختلفين من المقدار ، واعتبارهما من نفس النوع لا يعطى أى مزية سوى الصحة الفلسفية . ومع ذلك فكاها بالضبط أمثلة للانهائيات الصغر ، ومتسلسلاتها توضح جيدا نسبية المصطلح « لانهائى الصغر » .

---

(١) انظر الجزء السادس الباب الخامس والأربعين .

(٢) انظر الجزء السادس الباب السابع والأربعين بند ٣٩٧ .

وهناك طريقة طريفة للموازنة بين مقادير معينة شبيهة بانقسامات أى مجموعات لامتناهية من النقط وبين مقادير الامتدادات المتصلة ، وهى طريقة يقدمها شتولز [١]، كما يقدم كانتور [٢] طريقة شديدة الشبه بها ولكنها أعم . وهاتان الطريقتان رياضيتان إلى الحد الذى لا نستطيع أن نشرحهما بالتمام فى هذا المقام ، ولكننا قد نشرح كنه طريقة شتولز بإيجاز . لتكن مجموعة من النقط سَ تحويها فترة ما متناهية من ا إلى ب . ثم اقسم الفترة إلى أى عدد ن من الأجزاء ، ثم اقسم كلا من هذه الأجزاء إلى أى عدد من الأجزاء ، وهكذا . ثم اجعل الأقسام المتتابعة بحيث تصبح جميع الأجزاء على مر التقسيم أصغر من أى عدد معلوم δ . وفى كل مرحلة ضُم معاً جميع الأجزاء التى تحتوى نقط سَ . وفى المرحلة الميمية اجعل المجموع الناتج لم . عندئذ ربما كانت الأقسام التابعة تقل عن هذا المجموع ، ولكنها لا يمكن أن تزيد عليه . ومن ثم كلما ازداد عدد الأقسام فإن لم يجب أن يقترب من النهاية هـ . فإذا كانت سَ ملتحمة خلال الفترة، سنحصل على هـ = ب — ا . فإذا تلاشت أى مشتقة متناهية من سَ ، كانت هـ = ٠ ومن الواضح أن هـ لها شبه بالتكامل المعين . ولكن ليست هناك شروط لازمة لوجود هـ .ولكن هـ لا يمكن أن تتطابق مع الانقسام ، لأن بعض المتسلسلات الملتحمة ، مثلا متسلسلات المنطقات أقل انقساماً من غيرها كالمتواصل ، ولكنها تعطى نفس قيمة هـ .

٣١٢ — الحالة التى افترضنا من قبل أن تكون فيها اللانهائيات الصغر واضحة بوجه خاص هى حالة المتسلسلات الملتحمة . فى هذه الحالة من المحتمل البرهنة أنه لا يمكن وجود قطع لانهائية الصغر [٣] بشرط إمكان القياس العددى أصلا — فإذا لم يكن ممكنا، لن يكون اللانهائى الصغر كما رأينا مُعرفا . فأولا من الواضح أن القطعة المحوية بين حدين مختلفين فهى دائما قابلة للانقسام إلى ما لانهاية له . لأنه ما دام هناك حد حـ بين أى حدين ا ، ب ، فهناك حد آخر ء بين ا ، حـ وهكذا . وبذلك لا يمكن أن تشتمل أى قطعة محدودة بنهاية على عدد متناه من الحدود .

---

(١) *Math. Annalen* 23 'Ueber einen zu einer unendlichen Punktmenge gehorigen Grenzwerth' .

(٢) انظر المرجع السابق Ueber unendliche lineare Punkmanningfaltigkeiten, No. 6.

(٣) انظر Peano, Rivrsta di Matematica Vol. II, pp. 58- 62

ولكن القطع المعرفة بفصل من الحدود قد لا يكون لها (كما رأينا فى الباب الرابع والثلاثين) حد نهائى . فنى هذه الحالة ستحتوى القطعة حدا ما آخر ب ، وإذن عددا لانهائيا من الحدود ، بشرط ألا تتكون القطعة من حد مفرد ا . وبذلك تكون جميع القطع منقسمة إلى ما لا نهاية له . والنقطة الثانية أن نعرف القطع الكثيرة . القطعتان المنتهيتان يمكن جمعهما بوضع قطعة مساوية لإحداهما عند آخر الأخرى لتكوين قطعة جديدة . فإذا كانت القطعتان متساويتين قيل إن القطعة الجديدة ضعف كل منهما . أما إذا لم تكن القطعتان منتهيتين لم يمكن استخدام هذه العملية . وفى هذه الحالة يعرف بيانو مجموعهما بأنه حاصل الجمع المنطقى لجميع القطع الحاصلة من جمع قطعتين منتهيتين متضمنتين على التوالى فى القطعتين المزمع جمعهما . وبعد تعريف هذا المجموع يمكن أن نعرف أى تضعيف multiple متناه من القطع . وبذلك يمكن تعريف فصل الحدود المتضمن فى تضعيف « ما » متناه من قطعتنا . أنه مثلا المجموع المنطقى لجميع تضعيف المتناهى . وإذا كانت قطعتنا تخضع لبديهية أرشميدس وذلك بالنسبة لجميع القطع الأكبر ، فإن هذا الفصل الجديد سيحوى جميع الحدود التى تأتى بعد أصل قطعتنا . ولكن إذا كانت قطعتنا لانهائية الصغر بالنسبة لأى قطعة أخرى ، عندئذ سيعجز الفصل المذكور عن أن يحتوى بعض نقط هذه القطعة الأخرى . وفى هذه الحالة يتبين أن جميع التضعيفات المتصاعدة لقطعتنا يساوى بعضها بعضها الآخر . ومن ثم يترتب على ذلك أن الفصل المتكون من المجموع المنطقى لجميع التضعيفات المتناهية لقطعتنا ، والذى يمكن أن نسميه التضعيف اللامتناهى لقطعتنا ، يجب أن يكون قطعة غير منتهية non-terminated لأن القطعة المنتهية terminated تتزايد دائما بالتضعيف . ويخلص الأستاذ بيانو من ذلك بقوله : « وكل نتيجة من هذه النتائج متناقضة مع الفكرة المألوفة عن القطعة . ولأن القطعة اللانهائية الصغر لا يمكن أن تجعل نهائية بواسطة أى ضرب لانهائى بالفعل ، فإنى أستنتج متفقا فى ذلك مع كانتور أنها لا يمكن أن تكون أحد عناصر المقادير المتناهية » (ص ٦٢) . ولكنى أظن أننا يمكن أن نصل إلى نتيجة أوثق ، لأننا رأينا فى المتسلسلات الملتحمة أن هناك قطعة

---

(١) المرجع السابق ص ٦١ ، بند ٩ .

قطع تناظر كل قطعة ، وأن هذه القطعة من القطع تتناهى دائما بقطعتها المعرفة . أكثر من ذلك أن القياس العددى لقطع القطع هو بالضبط نفس القيا س للقطع البسيطة . وبناء على ذلك بتطبيق النتيجة السابقة على قطع القطع نحصل على تناقض معين ، ما دامت ولا واحدة منها يمكن أن تكون غير منتهية ، والقطعة اللانهائية الصغر لا يمكن أن تكون منتهية .

أما فى حالة الأعداد المنطقة أو الحقيقية فإن معرفتنا التامة الحاصلة لنا عنها تجعل عدم وجود اللانهائيات الصغر مبرهنا عليه . فالعدد المنطق هو نسبة عددين صحيحين متناهيين ، وأى نسبة من هذا القبيل فهى متناهية . والعدد الحقيقى ما عدا الصفر فهو قطعة من متسلسلة المنطقات ، وعلى ذلك إذا كان س عددا حقيقيا خلاف الصفر . فهناك فصل ى ليس صفرا من المنطقات بحيث إذا كان ص أحد ى ، وكان ط أصغر من ص ، كان ط أحد س ، أى ينتمى للقطعة التى هى س . إذن كل عدد حقيقى بخلاف الصفر فهو فصل يحوى منطقات ، وجميع المنطقات متناهية . ويترتب على ذلك أن كل عدد حقيقى فهو متناه . بناء على ذلك إذا أمكن أن نتحدث بأى معنى عن الأعداد اللانهائية الصغر فلابد أن تكون بمعنى جديد ما أصلا .

٣١٣ — وأعرض الآن لمسألة فى غاية الصعوبة كان بودى ألا أذكر عنها شيئا ، وأعنى بها مسألة مراتب اللانهاية ولا نهائية الدوال فى الصغر . وقد انقسم أعظم الثقات حول هذه المسألة ، فيذهب ديبوس ريموند وشتولز وكثيرون غيرهما إلى أن هذه تكون فصلا خاصاً من المقادير تقع فيها اللانهائيات الصغر بالفعل ، على حين يقرر كانتور بشدة أن النظرية كلها باطلة[١] . ولنضع المسألة بأبسط ما يمكن فنقول : ليكن دالة د (س) نهايتها صفر كلما اقتربت س من الصفر . فقد يحدث أن النسبة $\frac{د(س)}{س^{ا}}$ ، إذا فرضنا ا عدداً مَّا حقيقيا متناهيا ، لها نهاية متناهية كلما اقتربت س من الصفر . ولا يمكن وجود من مثل ذلك العدد إلا واحد فقط ، وربما لا يوجد أى واحد . عندئذ قد يُسمى ا إن وجد مثل هذا العدد الرتبة التى تصبح عندها د (س) لانهائية الصغر ، أو رتبة الصغَر د (س) كلما اقتربت س من

---

(١) انظر Du Bois Reymond *Allgemeine Functionentheorie* (1882), p. 279 ff.; Stolz, *Al gemeine Arithmetik*, Part 1 (Leipzig, 1885) Section IX, Anhang; Cantor, Rivista di Matematica, V, pp. 104—8

الصفر . ولكن عند بعض الدوال مثل $\frac{١}{لو س}$ لا يوجد مثل هذا العدد ا . فإذا كان ا أى عدد حقيقى متناه، فنهاية $\frac{١}{س^{ا} لو س}$ كلما اقتربت س من الصفر لانهائية . بعبارة أخرى عندما تكون س صغيرة صغراً كافيا ، يكون $\frac{١}{س^{ا} لو س}$ كبيرا جدا ، ويمكن أن يجعل أكبر من أى عدد معين بجعل س صغيرة صغرا كافيا — وهذا صحيح مهما يكن العدد المتناهى ا . وعلى ذلك ، للتعبير عن رتبة صغر $\frac{١}{لو س}$ من الضرورى أن نبتدع عددا جديدا لانهائى الصغر يمكن أن ندل عليه بالرمز $ر^{ا}$. وبالمثل سنحتاج إلى أعداد كبيرة إلى غير حد للتعبير عن رتبة صغر (مثلا) هـ $-\frac{١}{س}$ كلما اقتربت س من الصفر . وليس هناك آخرٌ لتتالى هذه المراتب من الصغر : مثلا $\frac{١}{لو(لو س)}$ أصغر إلى ما لانهاية له من $\frac{١}{لو س}$ وهكذا . وبذلك نحصل على سلم بأسره من المقادير ، جميع المقادير فى أى فصل واحد منه لانهاية الصغر بالنسبة لجميع المقادير فى أى فصل أعلى ، وفى هذا السلم لا يوجد إلا فصل واحد فقط يتكون من جميع الأعداد الحقيقية المتناهية .

ويرى كانتور فى هذا الشرح حلقة مفرغة ، ويبدو أن كانتور على صواب على الرغم من صعوبة المسألة . فهو يعترض بأن مثل هذه المقادير لا يمكن إدخالها إلا إذا كان عندنا من الأسباب ما يجعلنا نظن أن هناك مثل هذه المقادير . فالمسألة شبيهة بتلك الخاصة بالنهايات، ويذهب كانتور إلى أنه فى الحالة الحاضرة يمكن البرهنة على تناقضات محددة فيما يختص باللانهايات الصغر المفروضة. فإذا فرضنا وجود أعداد لانهائية الصغر ط ، إذن حتّى بالنسبة لها سنحصل على

$$نها \frac{١}{س^{ط} لو س} = ٠ \quad عندما \quad س = ٠$$

ما دامت $س^{ط}$ يجب آخر الأمر أن تزيد على $\frac{١}{٢}$. وهو يبين أنه حتّى الدوال المتصلة

والمتفاضلة والمنتظمة الزيادة قد يكون لها رتبة مبهمة بالكلية من الصغر أو اللانهاية . الواقع أنه بالنسبة لبعض هذه الدوال تتأرجح الرتبة بين قيم لامتناهية وقيم لانهائية الصغر بحسب الطريقة التى تقرب فيها من النهاية . وعلى ذلك نستطيع أن نختم القول فيما أرى بأن هذه اللانهائيات الصغر أوهام رياضية . ويمكن تعزيز هذا القول إذا اعتبرنا أنه إنْ وجدت أعداد لانهائية الصغر وجدت قطع لانهائية الصغر للمتواصل العددى ، مما رأينا من قبل أنه محال .

٣١٤ – خلاصة ما ذكرناه عن اللانهائى الصغر أنه أولا حد نسبى ، وأنه فيما يختص بالمقادير خلاف الانقسامات ، أو انقسامات الكلات اللامتناهية بالمعنى المطلق ، فليست لها القدرة أن تكون شيئاً آخر غير حد نسبى . أما حيث يكون لها معنى مطلق حينئذ لا يتميز هذا المعنى عن التناهى . وقد رأينا أن اللانهائى الصغر ولو أنه عديم الفائدة كلية فى الرياضيات ، إلا أنه يقع فعلاً فى بعض الحالات ، مثال ذلك أطوال الخطوط المستقيمة المحدودة ، فهى لا نهائية الصغر بالنسبة لمساحات المضلعات ، كما أن هذه لانهائية الصغر بالنسبة لأحجام كثيرات السطوح . ولكن مثل هذه الحالات الحقيقية من اللانهائيات الصغر هى كما رأينا معتبرة دائما عند الرياضيين كمقادير من نوع آخر إذ لا موازنة عددية ممكنة ، حتى بواسطة الأعداد المتصاعدة بين المساحة والطول ، أو بين الحجم والمساحة . الواقع القياس العددى يعتمد بالكلية على بديهية أرشميدس ، ولا يمكن أن يمتد ، كما فعل ذلك كانتور فى الأعداد . ورأينا أخيرا أنه لا توجد قطع لانهائية الصغر فى المتسلسلات الملتحمة . وأن – مما هو مرتبط بذلك ارتباطا وثيقا – مراتب صغر الدوال لا ينبغى أن تعتبر كلا نهائيات الصغر الحقيقية . يمكن إذن أن نختم القول بأن اللانهائى الصغر تصورٌ محدود جدا ولا أهمية له رياضيا، وأن اللانهاية والاتصال مستقلان على السواء عنه .

الباب الواحد والأربعون

الحجج الفلسفية الخاصة باللانهائى الصغر

٣١٥ – أتممنا الآن عرضنا الموجز لما تريد الرياضة أن تقوله فيما يختص بالمتصل ، واللانهاية ، واللانهائى الصغر . ونستطيع ههنا إذا لم يكن فلاسفة سابقون قد بحثوا هذه الموضوعات أن نغفل المناقشة وأن نطبق مذاهبنا على المكان والزمان . لأنى أتمسك بالرأى المتناقض من أن ما يمكن البرهنة عليه رياضيا فهو صادق . وحيث إنه يكاد أن يكون جميع الفلاسفة ممن يخالفون هذا الرأى ، وحيث إن كثيرين قد كتبوا حججا بارعة فى تأييد وجهات من النظر مباينة لما بسطناه من قبل ، فمن الضرورى أن نفحص بطريقة جدلية الأصناف الرئيسية للنظريات المقابلة ، وأن ندافع ما أمكننا عن النقط التى أختلف فيها مع الثقات من المؤلفين . ولهذا الغرض سيكون كتاب كوهين الذى أشرنا إليه من قبل مفيدا بوجه خاص ، ليس فقط لأنه يبحث صراحةً فى قضيتنا الحاضرة ، بل لأنه أيضا بسبب امتيازه فى العرض التاريخى قد وقع فى بعض أخطاء رياضية فى غاية الأهمية ، يلوح لى أن الكتاب يشتمل عليها ، وهى التى أضلت غيره من الفلاسفة ممن ليست عندهم معرفة مباشرة بالرياضيات الحديثة[1] .

٣١٦ – فى العرض المذكور من قبل ظهر التفاضل كأنه تطبيق غير هام فلسفياً لمذهب النهايات . الواقع لولا أهميته التقليدية ما استحق منا مجرد الذكر . وقد رأينا أن تعريفه لا يتطلب حيثما كان اللانهائى الصغر . لأن د س ، د ص فى التفاضل ليسا بذاتهما شيئا، وليس $\frac{د ص}{د س}$ كسراً . من أجل ذلك حل فى المؤلفات الحديثة عن الحساب التحليلى الاصطلاح دَ (س) محل $\frac{د ص}{د س}$ ، ما دامت الصورة الأخيرة توحى بمفاهيم خاطئة . وقد نلاحظ أن الاصطلاح دَ (س) أكثر شبها برمز نيوتن صَ ، ويرجع هذا التشابه إلى هذه الحقيقة وهى أن الرياضيات الحديثة فى هذه النقطة أكثر توافقا مع نيوتن منها مع ليبنتز . لقد استخدم ليبنتز الصورة $\frac{د ص}{د س}$ لأنه كان

---

(١) مثال ذلك مستر « لاتا » فى مقالته "On the Relation of the Philosophy of Spinoza and that of Leibniz" *Mind* N. S. No. 31.

يعتقد فى اللانهائيات الصغر ؛ أما نيوتن فهو يقرر جازماً أن الفروق fluxion التى يقول بها ليست كسرا . وفى ذلك يقول : « تلك النسب النهائية التى تتلاشى معها الكميات ليست حقاً نسب كميات نهائية ، بل نهايات تتقارب منها دائما نسب الكميات المتناقصة بغير نهاية ، وتقترب منها بأقرب من أى فرق معلوم »[1] .

ولكن عندما نتجه نحو مؤلفات مثل كتاب كوهين نجد أن ءس ، ءص يؤخذان على أنهما شيئان منفصلان ، على أنهما لانهائيان فى الصغر حقيقةً ، كالعناصر الحقيقية التى منها يتكوّن المتواصل . (الصفحات ١٤ ، ٢٨ ، ١٤٤ ، ١٤٧) . إن النظرة القائلة بأن الحساب التحليلى يحتاج إلى اللانهائيات فى الصغر ليست فيما يُظن نظرةً معروضة للسؤال . مهما يكن من شىء لا حجج أيا كانت تقدم لتأييدها . وهذه النظرة يفرض بكل تأكيد معظم الفلاسفة الذين يناقشون الحساب التحليلى أنها واضحة بذاتها . فلننظر نحن أى نوع من الأسس يمكن أن نتقدم بها فى تأييدها .

٣١٧ — كثير من الحجج المؤيدة للنظرة المذكورة يستمدها معظم الكتاب من المكان والحركة — وهى حجج يؤيد كوهين إلى حد ما (ص ٣٤ ، ٣٧) ولو أنه يسلم بأن التفاضل يمكن أن نحصل عليه من الأعداد وحدها التى يعدها مع ذلك متبعا فى ذلك كانط متضمنةً الزمان (ص ٢٠ ، ٢١) . وحيث لم يحن الأوان بعد لتحليل المكان والحركة ، فسأقتصر فى الوقت الحاضر على ذكر الحجج التى يمكن أن تستمد من أمثلة عددية بحتة . ولأجل التحديد سأستخرج بقدر الطاقة الآراء التى أجادلها من كوهين .

٣١٨ — يبدأ كوهين (صفحة ١) بقوله إن مشكلة اللانهائى الصغر ليست منطقية بحتة ، بل الأولى أنها تنتمى لنظرية المعرفة التى تتميز ، فيما أظن ، بأنها تعتمد على أنواع الحدس الخالص كما تنتمى للمقولات . هذا الرأى الكانطى يتعارض تماماً مع الفلسفة التى تقوم فى أساس كتابى هذا ، ومناقشة هذا الرأى

---

(١) Principia, Bk 1, Section1, Lemma XI, Scholium. والشرح بأسره فى غاية الأهمية ولو أن بعض أجزائه لا تقل فى أخطائها عن الفقرة التى نقلناها عن المتن .

ههنا يبعدنا كثيرا عن الموضوع الذى نناقشه ، وإنما ذكرته لتفسير عبارات الكتاب الذى نبحث فيه . ثم يشرع كوهين فوراً فيرفض النظرة القائلة بأن الحساب اللانهائى الصغر يمكن أن يشتق مستقلا بواسطة الرياضيات بطريقة النهايات . ويقول (ص١) « إن هذه الطريقة تقوم على فكرة أن التصور الأولى للتساوى ينبغى أن نكمله بمفهوم مضبوط للنهاية . وهكذا نجد أولا أن تصور التساوى مفروض من قبل . . . وثانيا أن طريقة النهايات تفترض فى أساسها تصور المقدار . . . ولكن المقدار النهائى مفروض قبلا فى نفس الوقت فى تصور المقدار المفروض من قبل . والمساواة المعرفة فى المذهب الأولى للمقدار ، لا يلتى إلى هذه المقادير النهائية بالا ، إذ فى هذا المذهب المقادير تعد باعتبار أنها متساوية إذا كان فرقها يتكون من مقدار نهائى ، وعلى الرغم من أن هذا الفرق هو كذلك . وعلى ذلك فإن التصور الأولى للتساوى — وهذا ليس فكرة طريقة النهايات — لا يجب أن يكمل بمقدار ما يجب أن يصحح بواسطة تصور النهاية . يجب إذن أن يُعتبر التساوى مرحلة أسبق من العلاقة النهائية[1] » .

٣١٩ — نقلت هذه الفقرة كاملة لأن ما فيها من أخطاء نموذج لما يمكن أن يقع فيه غير الرياضيين . أول كل شىء لا صلة للتساوى بالنهايات . إنى لأتصور أن كوهين قد طاف بذهنه مثل تلك الحالات كالدائرة والمضلع المرسوم داخلها حيث لا يمكن القول إن الدائرة مساوية لأى من المضلعات ، بل إنها فقط نهايتها . أو خذ مثالا من الحساب ، سلسلة تقاربية مجموعها π أو $\sqrt{٢}$. ولكن فى جميع هذه المجالات هناك كثير من الأشياء خارجة عن الموضوع وعارضة وهناك تعقيدات كثيرة غير ضرورية . وأبسط حالة على الإطلاق للنهاية هى حالة ω معتبرة كنهاية الأعداد الترتيبية . فهنا لا شك أنه لا يوجد أى نوع من التساوى . ومع ذلك فى جميع الأحوال التى تعرف فيها النهايات بالمتواليات — وهذه هى الحالات العادية — يكون عندنا متسلسلة من الصنف الذى تعرضه كلا الترتيبات المتناهية مع ω . واعتبر مثلا المتسلسلة $٢ - \frac{١}{ن}$ مأخوذةً مع ٢ ، حيث ن يمكن أن تأخذ جميع القيم الموجبة الصحيحة المتناهية . هنا نجد أن المتسلسلة هى من نفس الصنف كسابقتها ،

---

(١) أو النسبة ، واللفظية الألمانية هى Grengverhaltniss

وهنا كما كان الأمر من قبل ٢ هو نهاية المتسلسلة . ولكن هنا — وهذا ما أضل كوهين — الفرق بين ٢ وبين الحدود المتتالية للمتسلسلة يصبح أقل من أى مقدار معين ، وهكذا يلوح أننا نحصل على صفة ممتدة بين ٢ وبين الحدود المتأخرة للمتسلسلة ٢ — $\frac{1}{ن}$. ولكن دعنا نفحص هذا الأمر ؛ إنه أولا يعتمد على أن المنطقات متسلسلة فيها مسافات هى بدورها منطقات . ولكننا نعرف أن المسافات غير لازمة للنهايات ، وأن الامتدادات تساويها فى التأثير فإذا أخذنا الامتدادات فى الاعتبار كان ٢ نهاية ٢ — $\frac{1}{ن}$ لأنه لا منطق يأتى بين ٢ وجميع حدود المتسلسلة ٢ — $\frac{1}{ن}$ ؛ وهذا بالضبط المعنى الذى يكون فيه $\frac{1}{ن}$ النهاية للأعداد الصحيحة المتناهية . وبسبب أن ٢ — $\frac{1}{ن}$ تكوّن متوالية أى أنها شبيهة بمتسلسلة الأعداد الصحيحة ، إنما عرفنا أن نهايتها هى ٢ . أما أن الحدود كلما تقدمنا تختلف قليلا عن ٢ ، فذلك يعتمد إما على حصولنا على متسلسلة يوجد فيها مسافة وهى حالة عرضية بعيدة عن موضوعنا ، وإما على أن الامتدادات المتتالية إلى ٢ قد تجعل أقل من أى امتداد معين إلى ٢ ، وهذا يترتب على فكرة النهاية ولكن لا شأن له بالتساوى . وحيثما كانت متسلسلتنا التى سيكون لها نهاية جزءاً من متسلسلة هى دالة ﻫ ، فالامتداد من أى حد إلى النهاية ، فهو دائما لا نهائى بالمعنى الوحيد الذى يكون فيه لمثل هذه المتسلسلات امتدادات لا نهائية . وبمعنى حقيقى جدا لا يصبح الامتداد أصغر كلما اقتربنا من النهاية ، لأن كلا من العدد الترتيبى والأصلى لحدوده يظل ثابتا .

لقد رأينا بما فيه الكفاية من قبل بأى معنى وإلى أى حد يدخل المقدار فى النهايات بحيث يلوح لنا من غير الضرورى الإطناب فى هذا الموضوع ههنا . والمقدار بلا نزاع « غير » داخل على معنى أن النهاية والحدود المحدودة بالنهاية لا بد أن تكون مقادير ، وهذا هو بلا ريب المعنى الذى قصده كوهين . وكل متوالية تكون جزءاً من متسلسلة هى دالة ﻫ وفيها حدود بعد المتوالية ، فلها نهاية مهما كانت طبيعة الحدود . وكل متسلسلة قطع لا نهاية لها فى متسلسلة ملتحمة ، فلها نهاية مهما كانت طبيعة المتسلسلة الملتحمة . والآن يوجد بالطبع فى جميع المتسلسلات مقادير وهى بالذات انقسامات الامتدادات ؛ ولكن ليست هذه هى التى نلتمس فيها النهاية . وحتى فى حالة القطع فالنهاية قطعة بالفعل لا مقدار قطعة . وكل

ما نطلبه إنما أن تكون القطع فصولا ، لا أن تكون كميات . ولكن التمييز بين الكميات والمقادير أمرٌ بطبيعة الحال غريب بالكلية عن نظام أفكار كوهين .

٣٢٠ — ونقبل الآن على خطأ أعظم. يقول كوهين إن تصور المقدار المفروض من قبل فى النهايات يفرض بدوره المقادير النهائية . وهو يعنى بالمقادير النهائية كما يظهر من السياق ، اللانهائيات الصغر ، الفروق الأخيرة ، فيما أفترض بين حدود متسلسلة ونهايتها . ويلوح أن ما يعنيه هو أن أنواع المقدار التى تؤدى إلى نهايات هى متسلسلات ملتحمة ، ولا بد أن يوجد فى المتسلسلات الملتحمة لا نهائيات فى الصغر . وكل نقطة فى هذا الرأى خاطئة ، لأن النهايات كما رأينا لا تحتاج إلى أن تكون نهايات مقادير ، وقطع المتسلسلة الملتحمة كما رأينا فى الباب السابق لا يمكن أن تكون لا نهائية الصغر ؛ والنهايات لا تستلزم بأى حال أن تكون المتسلسلة التى تقع فيها ملتحمة . وقد برهنا على هذه النقط بما فيه الكفاية من قبل فلا ضرورة للوقوف عندها أكثر من ذلك .

٣٢١ — ولكن رأس الأخطاء هو الافتراض بأن النهايات تجلب معنى جديدا من التساوى . فالتساوى له بين المقادير — كما رأينا فى الجزء الثالث — معنى دقيق فريد على الإطلاق، لأنه إنما ينطبق فقط على الكميات، ويعنى أن لها «نفس» المقدار . فلا محل ههنا للتقريب ؛ إذ المقصود هو ببساطة التطابق المنطقى المطلق للمقدار . أما بين الأعداد (التى يرجح أن كوهين يعتبرها كمقادير) فلا يوجد مثل هذا التساوى ، بل يوجد تطابق . وتوجد العلاقة التى يُعبر عنها عادة بعلامة التساوى كما هو الحال فى المعادلة ٢×٣ = ٦ . وقد حيرت هذه العلاقة أولئك الذين حاولوا التفلسف حول الحساب إلى أن قام بيانو بشرحها[١] . عندما يكون حد واحد من المعادلة عدداً مفردا ، بينما الآخر يكون تعبيرا مركبا من عددين أو أكثر ، فالمعادلة تدل على أن الفصل المعرف بواسطة التعبير يحوى حدا واحداً فقط هو العدد المفرد فى الجانب الآخر من المعادلة . هذا التعريف مرة أخرى دقيق تماماً ، إذ ليس فيه أى شىء تقريبى ، كما أنه قاصر عن أى تعديل بواسطة اللانهائيات فى الصغر . وإنى لأتصور أن ما يعنيه كوهين ربما عبرنا عنه بما يأتى : عند تكوين معامل

---

(١) انظر مثلا .Riv. di Mat. VII, p. 35

تفاضلى فلنعتبر عددين سہ، سہ + ء سہ ، ثم عددين آخرين صہ . صہ + ء صہ .
وفى الحساب الابتدائى يعتبر أن سہ ، سہ + ء سہ متساويان ، ولكن لا يعتبران
كذلك فى الحساب التحليلى . الواقع توجد طريقتان لتعريف التساوى . فيقال إن
حدين متساويان عندما تكون نسبتهما الوحدة ، أو عندما يكون الفرق بينهما صفرا .
أما إذا سمحنا باللانهائيات الصغر الحقيقية ء سہ ، فإن سہ ، سہ + ء سہ سيكون
لهما نسبة الوحدة ratio unity ، ولكن لن يكون الفرق بينهما صفرا ، ما دامت
ء سہ مختلفة عن الصفر المطلق . هذه النظرة التى أذهب إلى أنها تكافئ نظرة
كوهين ، تعتمد على فهم خاطىء للنهايات والحساب التحليلى . فلا يوجد فى
الحساب التحليلى هذه المقادير مثل ء سہ ، ء صہ . هناك فروق متناهية Δسہ ، Δصہ ،
ولكن لا يمكن أن تجعل أى نظرة مهما تكن ابتدائية سہ مساوية لـ سہ + Δسہ .
وهناك نسب للفروق المتناهية . Δصہ/Δسہ وفى الحالات التى يوجد فيها مشتقة
صہ ، هناك عدد واحد حقيقى يمكن أن نجعل Δصہ/Δسہ تقترب منه بحسب ما نشاء
بتصغير Δسہ . هذا العدد الحقيقى المفرد نختاره ليدل على ءصہ/ءسہ ، ولكنه
ليس كسرا ، وليس ء سہ ، ء صہ شيئا آخر سوى حروف مطبوعة لرمز
واحد . ولا يوجد أى تصحيح أيا كان لفكرة التساوى بواسطة مذهب النهايات .
والعنصر الجديد الوحيد الذى أدخل . هو اعتبار الفصول اللانهائية للحدود المفرزة من
متسلسلة .

٣٢٢ — فيما يختص بطبيعة اللانهائى الصغر يخبرنا كوهين (ص ١٥) أن
التفاضل ، أو الغير الممتد inextensive . يجب أن يتطابق مع المركز the intensive
ويعتبر التفاضل كتجسيد لمقولة كانط عن الحقيقة . هذه النظرة (بمقدار استقلالها
عن كانط) نقلها كوهين عن ليبنتز موافقا إياه عليها ، أما أنا فلا بد لى من
الاعتراف بأنها تخلو فيما يلوح من كل ما يبررها . ويجب ملاحظة أن ء سہ ،
ء صہ إذا أجزنا أنهما شيئان لهما وجود على الإطلاق . فلا يجب أن نطابق
بينهما وبين الحدود المفردة فى متسلسلتنا ، ولا حتى مع الفروق بين الحدود المتعاقبة ،
بل يجب أن تكون دائما امتدادات تحوى عددا لا نهائيا من الحدود ، أو مسافات
تناظر مثل تلك الامتدادات . وههنا لا بد من التمييز بين متسلسلات الأعداد وبين

المتسلسلات التى إنما فيها فقط مسافات أو امتدادات قابلة للقياس . والمتسلسلات الثانية هى حالة الزمان والمكان . أما هنا فليس ء سہ ، ء صہ نقطا أو لحظات التى هى وحدها غير ممتدة حقا ، بل إنهما أصلا أعداد ، وعلى ذلك يجب أن يناظرا الامتدادات أو المسافات اللانهائية الصغر – إذْ من المحال تعيين نسبة عددية لنقطتين أو ، كما فى حالة السرعة ، لنقطة ولحظة . ولكن د سہ ، د صہ لا يمكن أن يمثلا مسافات النقط المتعاقبة ، ولا حتّى الامتداد المتكون من نقطتين متعاقبتين . وفى مقابل هذا الرأى عندنا أولا الأساس العام من أن متسلسلتنا يجب أن تعتبر ملتحمة ، مما ينفى فكرة الحدود المتعاقبة . ومن المحال أن نتجنب ذلك إذا كنا بصدد البحث فى متسلسلة ليس فيها إلا امتدادت فقط لا مسافات ، لأن القول بأن هناك دائما عدداً لامتناهيا من النقط المتوسطة فيما عدا عندما يتكون الامتداد من عدده متناه من الحدود ، قول هو مجرد تكرار . ولكن إنْ وجدت مسافةٌ ، فقد يقال إن مسافة حدين ربما كانت متناهية وربما كانت لا نهائية الصغر ، وأن الامتداد ليس ملتحما بالنسبة للمسافات اللانهائية الصغر ، بل يتكون من عدد متناه من الحدود . فإذا أجزنا هذا مؤقتا ، فقد يمكن إما أن نجعل د سہ ، د صہ مسافة نقطتين متعاقبتين أو الامتدادين المركبين من نقطتين متعاقبتين . ولكن مسافة النقطتين المتعاقبتين بفرض مثلا أن كليهما يقعان على خط مستقيم واحد قد يلوح أنها ثابتة مما يعطى $\frac{ء صہ}{ء سہ} = \pm ١$. ولا يمكن أن نفترض فى حالات حيث كلا سہ ، صہ متصلتان ، والدالة ص أحادية القيمة كما يتطلب الحساب التحليلى ذلك ، أن يكون سہ ، سہ + ء سہ متعاقبتين دون أن تكون صہ ، صہ + ء صہ ؛ لأن كل قيمة ا صہ ستترابط مع قيمة واحدة ولا غير من سہ ، والعكس بالعكس . وبذلك لا يمكن أن تتخطى صہ أى قيم مفروضة متوسطة بين صہ ، صہ + ء صہ . ومن ثم إذا علمت قيم سہ ، صہ حتى بفرض اختلاف مسافات الحدود المتعاقبة من موضع إلى موضع فإن قيمة $\frac{ء سہ}{ء صہ}$ ستكون معينة . وأى دالة أخرى صہَ التى هى لقيمة ما ا سہ مساوية ا صہ سيكون لها مشتقةٌ مساوية لتلك القيمة ، وهذا خلف . فإذا اطرحنا هذه الحجج الرياضية جانبا فمن الواضح من أن ء صہ ، ء سہ سيكون لهما نسبة عددية هى أنه إذا كانا مقدارين مركزين intensive كما هو

مقترح ، فلا بد أن يكونا قابلين للقياس عدديا . أما كيف نجرى هذا القياس فأمر من المؤكد أنه ليس من اليسير تبينه . وربما جعلنا هذه النقطة أوضح بالاقتصار على حالتنا الأساسية التى فيها كلا سہ ، صہ عددان . فإذا اعتبرنا سہ ، سہ + ء سہ متعاقبين فلا بد أن نفترض إما أن صہ ، صہ + ء صہ متعاقبين ، وإما أنهما متطابقان ، وإما أن هناك عدداً متناهيا من الحدود بينهما أو عدداً لامتناهيا .

فإذا أخذنا الامتدادات لقياس ء سہ ، ء صہ ، ترتب على ذلك أن $\frac{ء ص}{ء س}$ يجب أن يكون دائما صفرا ، أو عددا صحيحا ، أو لا نهائيا ، وهذا خلف . بل قد يترتب على ذلك أنه إذا كانت صہ ليست ثابتة ، فيجب أن تكون $\frac{ء ص}{ء س} = \pm ١$. خذ مثلا صہ = سہ^{٢} حيث سہ ، صہ عددان حقيقيان موجبان . فكلما انتقلت سہ من عدد إلى ما يليه فلا بد أن تفعل صہ مثل ذلك ، إذ كل قيمة لـ صہ يناظرها قيمة لـ سہ ، وتكبر صہ كما كبرت سہ . وعلى ذلك إذا تخطت صہ العدد التالى لأى عدد من قيمها ، فلن تتمكن أبدا من الرجوع لالتقاطه . ولكننا نعرف أن أى عدد حقيقى فهو بين قيم صہ ، عندئذ يجب أن يكون صہ ، صہ + ء صہ متعاقبين ، $\frac{ء ص}{ء س} = ١$. فإذا قسنا بالمسافات لا بالامتدادات ، فلا بد أن تثبت المسافة ء صہ عند إعطاء صہ ، والمسافة ء سہ عند إعطاء سہ . فإذا كانت سہ = ١ ، ص = ١ إذن $\frac{ء ص}{ء س} = ٢$ ولكن ما دام سہ ، صہ هما نفس العدد وجب أن يكون ء سہ ، ء صہ متساويين ما دام كل منهما هو المسافة للعدد التالى . إذن $\frac{ء ص}{ء س} = ١$ ؛ وهذا خلف . وبالمثل إذا أخذنا لـ صہ دالة متناقصة ، وجدنا أن $\frac{ء ص}{ء س} = -١$. ومن ثم كان فى التسليم بالأعداد المتعاقبة القضاء المبرم على الحساب التحليلى ؛ وما دام التمسك بالحساب التحليلى واجبا . ففى هذا الحساب القضاء المبرم على الأعداد المتعاقبة .

٣٢٣ ـ الفكرة القائلة بوجوب وجود أعداد متعاقبة تعززها فكرة التغير المتصل

التى تتضمنها تسميتنا س . ص « متغيرين » . والتغير فى الزمان موضوع سنناقشه فى مرحلة متأخرة ، ولكنه أثر بلا شك أعظم الأثر على فلسفة الحساب التحليلى . فالناس يصورون المتغير لأنفسهم — بغير وعى غالبا — على أنه يأخذ بالتتالى متسلسلة من القيم كما يحدث فى مسألة ديناميكية . وعلى ذلك ربما يقولون : كيف يمكن انتقال س من س ١ إلى س ٢ دون أن تمر بجميع القيم المتوسطة ؟ وفى هذا الانتقال أليس يجب وجود قيمة تالية تأخذها س عند أول تركها قيمة س ١ ؟ فكل شىء يتصور على مثال الحركة التى يفرض فيها مرور نقطة بجميع الأوضاع المتوسطة فى طريقها . ولا أريد أن أقرر الآن أتكون هذه النظرة عن الحركة صحيحة أو لا ، ولكنها على أى حال بعيدة عن موضوعنا حيث يكون الأمر متعلقا بنقطة أساسية فى نظرية المتسلسلات المتصلة ، ولا بد من البت فى خواص مثل هذه المتسلسلات قبل التطلع إلى الحركة لتأييد وجهات نظرنا . ولنرجع إلى كوهين فأقول : إنى أعترف أنه يلوح عندى من الواضح أن المقدار المركز شىء مختلف بالكلية عن المقدار الممتد اللانهائى الصغر ، لأن هذا يجب دائما أن يكون أصغر من المقادير الممتدة المتناهية ، فيجب حينئذ أن يكون من نفس النوع وإياها ، أما المقادير المركزة فيظهر أنها لا تكون أبدا بأى معنى أصغر من أى مقادير ممتدة . وبذلك يظهر أن النظرية الميتافيزيقية التى علينا أن ننقذ بها اللانهائيات الصغر تخلو رياضيا وفلسفيا من الأسس التى يؤيدها .

٣٢٤ — بذلك لا يمكن أن نوافق على التلخيص التالى لنظرية كوهين (صفحة ٢٨) : « غاية ما أطلبه أن أتمكن من وضع عنصر بذاته ولذاته تناظر « أداة فكر » الحقيقة . ويجب أن ننصب أولا أداة الفكر هذه كى نتمكن من النفاذ إلى ذلك التركيب مع الحدس . أى مع الوعى بأنه معطى ، الذى يكمل فى مبدأ المقدار المركز . هذا الافتراض السابق للحقيقة المركزة كامن فى جميع المبادىء ، ويجب لذلك أن يجعل مستقلا . هذا الافتراض السابق هو معنى الحقيقة ، والسر فى تصور التفاضل » . والذى يمكن أن نوافق عليه ، والذى فيما أعتقد يقوم فى

خلط فى أساس العبارة المذكورة. هو أن كل متواصل يجب أن يتكون من عناصر أو حدود ، وهذه كما رأينا من قبل لن تحقق دالة ء س ، ء ص التى تقع فى مباحث الحساب التحليلى القديمة . وكذلك لا يمكن أن نوافق على قوله (صفحة ١٤٤) : « أن هذا المتناهى (أى ذلك الذى هو موضوع العلم الطبيعى) يمكن أن يظن بأنه مجموع تلك الحقائق اللانهائية الصغر المركزة ، بأنه تكامل معين » لأن التكامل المعين ليس مجموع عناصر متواصل ، على الرغم من وجود مثل هذه العناصر : مثال ذلك أن طول منحنى كما نحصل عليه بالتكامل ليس مجموع نقطة، بل بالضبط وفقط نهاية أطوال المضلع المرسوم داخله . والمعنى الوحيد الذى يمكن إعطاؤه لمجموع نقط المنحنى هو الفصل المنطقى الذى إليه تنتمى كلها ، أى المنحنى نفسه لا طوله . وجميع الأطوال مقادير انقسام امتدادات ، وجميع الامتدادات تتكون من عدد لا نهائى من النقط ، وأى امتدادين منتهيين فلهما نسبة متناهية بين أحدهما والآخر . وليس ثمة شىء كالامتداد اللانهائى الصغر ، وإن وجد فلن يكون عنصراً من المتواصل . والحساب التحليلى لا يحتاجه ، وافتراض وجوده يفضى إلى متناقضات . وفيما يختص بالفكرة القائلة بأنه فى كل متسلسلة لا بد من وجود حدود متعاقبة ، فقد بينا فى الباب الأخير من الجزء الثالث أنها تتطلب استخداماً غير مشروع للاستنباط الرياضى . وبناء على ذلك لا بد من اعتبار اللانهائيات الصغر من جهة تفسيرها للاتصال أنها غير ضرورية ، ومضللة . ومتناقضة مع ذاتها .

الباب الثانى والأربعون

فلسفة المتواصل

٣٢٥ – كانت لفظة «الاتصال» continuity تحمل لدى الفلاسفة وبخاصة منذ زمن هيجل معنى لا يشبه أبداً ذلك الذى خلعه عليها كانتور. وفى ذلك يقول هيجل[1] : « للكمية كما رأينا مصدران : الوحدة المطلقة exclusive unit ، والتطابق أو التساوى بين هذه الوحدات. فإذا نظرنا فى علاقتها المباشرة بنفسها، أو فى خاصية العينية الذاتية selfsameness التى نظهرها بالتجريد، وجدنا الكمية مقداراً « متصلا » Continuous . أما عندما ننظر فى خاصيتها الأخرى وهى الواحد الذى تستلزمه ، فهى مقدار « منفصل » Discrete » . وعندما نتذكر أن كلا الكمية والمقدار عند هيجل يعنى بهما « العدد الأصلى » ، فقد نظن أن قوله يريد به ما يأتى : « كثير من الحدود معتبرةً على أن لها عدداً أصليا يجب أن تكون كلها أعضاء فى فصل واحد . وبمقدار ما يكون كل منها مجرد حالة من فصل التصور ، فلا يتميز أحدها عن الآخر ، ومن هذا الوجه يسمى الكل الذى تركب منه « متصلا » . ولكن بالنسبة لكثرتها فيجب أن تكون حالات « متباينة » لفصل التصور ؛ ومن هذا الوجه يسمى الكل الذى تركب منه « منفصلا » . الحق إنى بعيد كل البعد عن إنكار – الواقع أننى أزعم بشدة – أن هذا التقابل بين التطابق والتعدد فى مجموعة يكوّن مشكلة أساسية فى المنطق – بل لعلها المشكلة الأساسية فى الفلسفة . ولأنها أساسية فلا نزاع أنها داخلة فى دراسة المتواصل الرياضى كما تدخل فى كل شىء آخر . ولكن ليس لها وراء هذا الارتباط أى علاقة خاصة بالمعنى الرياضى للاتصال ، كما يمكن أن نرى على الفور أنه لا صلة لها أيا كانت بالترتيب . وفى هذا الباب لن نناقش إلا المعنى الرياضى . وإنما نقلت نص المعنى الفلسفى لأقرر نهائيا أنه ليس هنا موضع للبحث . ولما كانت المنازعات حول الألفاظ قليلة الجدوى فلا بد أن أطلب من الفلاسفة أن يجردوا أنفسهم مؤقتا

(١) *Smaller Logic*, § 100, Wallace's Translation, p. 188.

من الروابط العادية بهذه اللفظة ، وألا يجيزوا لها من الدلالة سوى الحاصل عن تعريف كانتور .

٣٢٦ – عندما نقصر أنفسنا على المتواصل الحسابى ندخل فى نزاع بطريقة أخرى مع مفاهيم سابقة متداولة . ويلاحظ بوانكاريه[١] بحق عن المتواصل الحسابى أنه : « المتواصل المتصور على هذا النحو ليس شيئا آخر سوى مجموعة من الأفراد مرتبة بترتيب معين ، وهذه الأفراد صحيح أنها لا نهائية فى العدد ، ولكن الواحد منها يقع خارج الآخر . وليس هذا هو التصور المألوف الذى نفرض فيه فيما بين عناصر المتواصل ضرباً من الرابطة الوثيقة تجعل منها كلا ليست النقطة فيه أسبق من الخط بل الخط أسبق من النقطة . وإذا رجعنا إلى الصيغة المشهورة : المتواصل وحدة فى كثرة multiplicity ، رأينا أن الكثرة وحدها هى الموجودة أما الوحدة فقد اختفت » .

ولقد ظل دائما الموضوع مفتوحا للبحث : هل المتواصل مركب من عناصر . وحتى حين أجيز أن يكون مشتملا على عناصر ، فقد قيل غالبا إنه ليس « مركبا » من هذه العناصر . وهذه الوجهة الأخيرة من النظر ذهب إليها حتى أعظم مؤيد للعناصر فى كل شىء مثل ليبنتز[٢] . غير أن جميع هذه الوجهات من النظر إنما تكون ممكنة فقط بالنسبة لمثل هذه المتواصلات كالمكان والزمان . والمتواصل الحسابى موضوع مختار بواسطة التعريف ، ويتكون من عناصر بمقتضاه ، ومن المعروف أن حالة واحدة على الأقل تتضمنه هى بالذات حالة قطع الأعداد المنطقة . وسأذهب فى الجزء السادس من هذا الكتاب إلى أن الفراغات هى أمثلة أخرى للمتواصل الحسابى . والسبب الرئيسى فى النظريات البارعة والمتناقضة عن المكان والزمان واتصالهما ، تلك النظريات التى صاغها الفلاسفة ، هو المتناقضات المزعومة فى المتواصل المركب من عناصر . والقضية المطروحة فى هذا الباب هى أن متواصل كانتور يخلو من المتناقضات . وهذه القضية كما هو واضح يجب أن تتقرر على أسس ثابتة قبل أن نتمكن من الموافقة على إمكان أن يكون الاتصال الزمكانى من

---

(١) Revue de Métaphysique et de Marala, Vol. 1, p. 26.

(٢) انظر للمؤلف *The Philosoply of Leibniz*, Chap. IX.

النوع الكانتورى . وفى هذه الحجة سأفترض أن قضية الباب السابق مبرهن عليها، وهى أن الاتصال الذى سنناقشه لا يتطلب التسليم باللانهائيات الصغر بالفعل .

٣٢٧ — فى هذا العالم الهوائى لستَ تجد شيئا أكثر هوائية من الشهرة التى يظفر بها الكاتب بعد وفاته . ومن أبرز ضحايا فقدان الشهرة بسبب نقص الحكم هو زينون الإيلى، الذى بعد أن اخترع أربع حجج كلها دقيقة وعميقة إلى غير حد ، حكم عليه من جاء بعده من الفلاسفة بفظاظتهم أنه ليس سوى مجرد مهرج بارع ، وأن حججه كلها مغالطات . وبعد ألفى عام من الرفض المستمر أعيد لهذه المغالطات اعتبارها ، وجعلت أساس نهضة رياضية على يد أستاذ ألمانى أكبر الظن أنه لم يحلم أبدا بوجود أى ارتباط بينه وبين زينون . ذلك أن ڤيَيَرشْتَراس بعد نفيه الجازم لجميع اللانهائيات الصغر بيَّن آخر الأمر أننا نعيش فى عالم لا متغير ، وأن السهم فى كل لحظه من انطلاقه ساكن حقا . النقطة الوحيدة التى لعل زينون أخطأ فيها هى استنتاجه (إن كان قد استنتج) أنه حيث لا يوجد تغير ، فينبغى إذن أن يكون العالم فى نفس الحالة فى وقت كما يكون فى وقت آخر . هذه النتيجة لا تترتب بأى حال على حججه ، وفى هذه النقطة نجد الأستاذ الألمانى أكثر إنشاء من اليونانى البارع . ولما كان ڤيرشتراس قادراً على إلباس آرائه ثوب الرياضيات ، حيث تستبعد الألفةُ بالحق الأفكار المتحيزة العامية الناشئة من الفطرة السليمة ، فقد استطاع أن يخلع على قضاياه ما يبدو على التفاهات من هيئة محترمة . وإذا كانت النتيجة التى انتهى إليها أقل بهجة عند محب العقل من تحدى زينون الجرىء ، ففيها على كل حال قدر أكثر من الحساب يرضى جمهور الأكاديميين من الناس .

لما كانت حجج زينون تتصل بوجه خاص بالحركة ، لذلك كانت على ما هى عليه غير داخلة فى عرضنا الحاضر . ولكن من المفيد ترجمتها بقدر الطاقة إلى لغة حسابية[1] .

٣٢٨ — الحجة الأولى ، وهى القسمة الثنائية ، تقول : « لا توجد حركة ، لأن ما يتحرك لا بد أن يبلغ منتصف طريقه قبل أن يبلغ آخره » . بعبارة أخرى

---

(١) لأنى لست باحثاً يونانياً فلا أزعم لنفسى معرفة مباشرة بما ذكره زينون فعلا أو قصده . وصورة حججه الأربعة التى استخدمها مستمدة من المقالة الهامة للأستاذ نويل **'Le mouvement et les arguments** de Zénon d'Elée'' *Revue de Métaphysiauebet de Marde*, Vol. I, pp. 107—125. وهذه الحجج على أى حال جديرة بالنظر ، ولما كنت آخذها على أنها مجرد نص للمناقشة ، فصحتها التاريخية قليلة الأهمية .

أى حركة مهما كانت نفرض وقوعها . فإنها تفترض من قبل حركة أخرى ، وهذه بدورها حركة أخرى ، وهكذا إلى ما لا نهاية . وعلى ذلك هناك تراجع لانهائى فى مجرد فكرة أى حركة معينة . هذه الحجة ولو أنه يمكن وضعها فى صورة حسابية إلا أنها تبدو حينئذ أقل استحسانا . ليكن متغير س قابل لجميع القيم الحقيقية (أو المنطقة) بين نهايتين معلومتين مثلا بين ٠ ١ . عندئذ فصل قيم س كل لانهائى أجزاؤه سابقة منطقيا عليه . لأن له أجزاء ولا يمكن أن يوجد إذا نقص أى جزء من الأجزاء . على ذلك الأعداد من ٠ إلى ١ تفترض قبلا الأعداد من ٠ إلى $\frac{1}{2}$ ، وهذه تفترض قبلا الأعداد من ٠ إلى $\frac{1}{4}$ ، وهكذا . ومن ثم يلوح أن هناك تراجعا لا نهائيا فى فكرة أى كل لامتناه . ولكن بدون هذه الكلات اللامتناهية لا يمكن تعريف الأعداد الحقيقية ، وينهار الاتصال الحسابى الذى ينطبق على متسلسلة لامتناهية .

هذه الحجة يمكن الرد عليها بطريقتين يبدو لأول وهلة أن أى طريقة منهما كافية ، غير أن كليهما ضرورى فى الحقيقة . فأولا يمكن أن نميز بين نوعين من التراجع اللانهائى أحدهما لا ضرر منه . وثانيا يمكن أن نميز نوعين من الكل : المجموعى والتوزيعى . ونقرر أنه فى النوع الثانى ليست الأجزاء المتساوية التركيب مع الكل سابقة عليه منطقيا . ولا بد أن نشرح هاتين النقطتين كل منهما على انفراد .

٣٢٩ ـ التراجع اللانهائى قد يكون على نوعين . فى النوع المعترض عليه تلتئم قضيتان أو أكثر لتكوين معنى قضية ما ؛ ومن هذه المكونات يوجد واحد على الأقل معناه مركب كذلك ؛ وهكذا إلى ما لا نهاية . وتنشأ عادة هذه الصورة من التراجع من التعاريف الدائرية . مثل هذه التعاريف قد تمد بطريقة شبيهة بتلك التى فيها تنشأ الكسور المتصلة من المعادلات التربيعية . ولكن فى كل مرحلة الحد المطلوب تعريفه سيعود إلى الظهور ، وحينئذ لا ينتج التعريف . خذ مثلا ما يأتى : « يقال إن شخصين عندهما نفس الفكرة عندما تكون أفكارهما متشابهة ، وتكون الأفكار متشابهة عندما تشتمل على جزء متطابق » . فلو صح أن الفكرة لها جزء ليس فكرة ، فلا اعتراض منطقيا على مثل هذا التعريف . أما إذا كان جزء الفكرة

فكرة عندئذ فى الحالة الثانية حيث يقع تطابق الأفكار . يجب أن يستبدل التعريف وهكذا . وبذلك حيثما كنا بصدد « معنى » قضية ، فالتراجع اللانهائى يكون موضع اعتراض ، ما دمنا لا نبلغ أبدا قضية لها معنى محدد . ولكن كثيرا من التراجعات اللانهائية ليست من هذه الصورة . إذا كانت قضية معناها محدود تماماً ، وكانت ا تستلزم ب ، ب تستلزم حـ ، وهكذا كان هذا التراجع اللانهائى من نوع لا اعتراض عليه ألبتة . وهذا يعتمد على أن اللزوم علاقة تركيبية ، وأنه ولو أن ا كانت جملة من القضايا ، وكانت ا تستلزم أى قضية هى جزء منها ، فلا يترتب على ذلك بأى حال أن أى قضية تستلزمها ا هى جزء من ا . وبذلك ليست هناك ضرورة منطقية كما كان فى الحالة السابقة لتكميل التراجع اللانهائى قبل أن تكتسب ا معنى . فإذا أمكن عندئذ أن نبين أن لزوم الأجزاء فى الكل عندما يكون الكل فصلا لا متناهيا من الأعداد هو من هذا النوع الثانى ، فسيفقد التراجع الذى يوحى به حجة زينون القائمة على القسمة الثنائية مزيته .

٣٣٠ — ولكى نبين أن الحالة كذلك يجب التمييز بين الكلات التى تعرف ماصدقيا extentionally ، أى بعد حدودها ، وبين تلك التى تعرف بالمفهوم ، intensionally ، أى فصل الحدود التى لها علاقة ما بحد ما معلوم ، أو بعبارة أبسط فصل من الحدود . (لأن فصل الحدود عندما يكون كلا فهو مجرد جميع الحدود التى لها فصل العلاقة لفصل تصور[1]) . ولكن الكل الماصدق — على الأقل بمقدار ما تستطيع الطاقة الإنسانية أن تمتد — هو بالضرورة متناه : فنحن لا نستطيع أن نحصى أكثر من عدد متناه من الأجزاء المنتمية لكل ، وإذا كان عدد الأجزاء لا متناهيا وجب أن تعرف بطريقة أخرى خلاف العد . وهذا بالضبط ما يفعله فصل التصور : الكل الذى تكون أجزاؤه حدوداً فى فصل يعرف تماماً عند تخصيص فصل التصور ؛ وأى فرد محدد ، فإما أن ينتمى أو لا ينتمى للفصل المذكور . والفرد من الفصل جزء من كل ماصدقات الفصل ، وهو متقدم منطقيا على هذه الماصدقات مأخوذةً جملةً . ولكن الماصدق نفسه يقبل التعريف بغير إشارة لأى فرد متخصص ، ويوجد كشىء حقيقى حتى عندما لا يشتمل الفصل

(١) انظر ما سبق الجزء الأول البابين السادس والعاشر .

على أى حد . فأن نقول عن مثل هذا الفصل إنه لا نهائى هو أن نقول إنه على الرغم من أن له حدوداً إلا أن عدد هذه الحدود ليس أى عدد متناه — وهى قضية مرة أخرى يمكن تقريرها بدون تلك العملية المستحيلة من عد جميع الأعداد المتناهية . وهذه بالضبط هى حالة الأعداد الحقيقية من ٠ إلى ١ ؛ فهى تكوّن فصلا محدوداً نعرف معناه متى عرفنا المقصود من : العدد الحقيقى ، ٠ ، ١ ، وبين . أما أعضاء الفصل الخاصة ، والفصول الصغيرة التى تحتويها فليست متقدمة منطقيا على الفصل . وهكذا يقوم التراجع اللانهائى على مجرد هذه الحقيقة وهى أن كل قطعة من الأعداد الحقيقية أو المنطقة فلها أجزاء هى بدورها قطع . ولكن هذه الأجزاء ليست منطقيا متقدمة عليها ، ولا ضرر ألبتة من التراجع اللانهائى . وبذلك يقوم حل الصعوبة على نظرية الدلالة وتعريف الفصل بالمفهوم .

٣٣١ — حجة زينون الثانية هى الأشهر : وهى المتعلقة بأخيل والسلحفاة . وتجرى على هذا النحو : « الأبطأ لن يلحقه الأسرع أبدا ، لأن المطارد يجب أولا أن يبلغ النقطة التى منها رحل الهارب ، وبذلك يبقى الأبطأ بالضرورة دائما متقدما » . عند ترجمة هذه الحجة إلى لغة حسابية يتبين أنها متعلقة بترابط الواحد بالواحد لفصلين لا متناهيين . فإذا كان على أخيل أن يدرك السلحفاة ، فلا بد أن يكون طريق السلحفاة جزءاً من طريق أخيل . ولكن ما دام كل منهما فى كل لحظة عند نقطة معينة من طريقه ، فالآنية تقرر ترابط واحد بواحد بين أوضاع أخيل وبين أوضاع السلحفاة . ويترتب على ذلك أن السلحفاة فى أى وقت معلوم تمر بعدد من المواضع يساوى بالضبط ما يمر به أخيل . وعلى ذلك — وبذلك نرجو أن ننتهى إلى نتيجة — من المحال أن يكون طريق السلحفاة جزءاً من طريق أخيل . هذه النقطة ترتيبية بحتة ويمكن توضيحها بالحساب . خذ مثلا ١ + ٢ س ، ٢ + س ، واجعل س تقع بين ٠ ، ١ وكلاهما داخلان . ولكل قيمة لـ ١ + ٢ س توجد قيمة واحد ولا غير لـ ٢ + س . والعكس بالعكس . على ذلك كلما تقدمت س من ٠ إلى ١ كان عدد القيم التى تأخذها ١ + ٢ س هو نفس عدد القيم التى تأخذها ٢ + س . ولكن ١ + ٢ س بدأت من ١ وتنتهى عند ٣ ؛ أما ٢ + س فقد بدأت من ٢ وتنتهى عند ٣ . بذلك يجب أن تكون قيم ٢ + س نصف قيم

١ + ٢ س ح . هذه الصعوبة العسيرة جدا حلها كانتور كما رأينا ، ولكن لما كانت تتعلق بفلسفة اللانهاية أكثر من تعلقها بالمتواصل فسأرجئ مناقشتها إلى الباب التالى .

٣٣٢ ــ الحجة الثالثة تتعلق بالسهم . « إذا كان كل شيء ساكنا أو متحركا فى مكان يساويه ، وإذا كان ما يتحرك يتحرك دائما لحظة فالسهم وهو منطلق لا يتحرك » . وقد ظن عادة أن هذه الحجة من الشناعة بحيث لا تستحق مناقشة جدية . وينبغى أن أعترف أن هذه الحجة تلوح لى أنها عبارة واضحة جدا لحقيقة ابتدائية جدا ، وقد كان إغفالها فما أعتقد سبباً فى تلك الحمأة التى تردت فيها طويلا فلسفة التغير . وسأعرض فى الجزء السابع من هذا الكتاب نظريةً عن التغير يمكن أن تسمى « ستاتيكية » ما دامت تجيز ملاحظة زينون الصائبة . أما فى الوقت الحاضر فأود أن أحجب الملاحظة عن أى إشارة للتغير ، وعندئذ نرى أنها أمر فى غاية الأهمية ومن أبسط الأشياء وأعمها تطبيقا ، نعنى : « كل قيمة ممكنة لمتغير فهى ثابت » . فإذا كان س ح متغيرا يمكن أن يأخذ جميع القيم من ٠ إلى ١ ، فجميع القيم التى يمكن أن تأخذها هى أعداد معينة مثل $\frac{١}{٢}$ أو $\frac{١}{٣}$ وهذه كلها ثوابت مطلقة . وبهذه المناسبة ربما كان من المستحسن ذكر كلمات قليلة عن المتغير . المتغير تصور أساسى فى المنطق وفى الحياة اليومية على سواء . ومع أنه يكون دائما مرتبطا بفصل مَّا ، إلا أن ارتباطه ليس مع الفصل ، ولا مع عضو خاص فى الفصل ، بل ولا مع الفصل كله ، وإنما مع « أى » عضو فى الفصل . ومن جهة أخرى ليس التصور ، هو « أى عضو فى الفصل » ، بل التصور هو ذلك الذى يدل هذا التصور عليه . ولست فى حاجة إلى التوسع فى الصعوبات المنطقية على هذا التصور ، فقد ذكرنا ما فيه الكفاية عن هذا الموضوع فى الجزء الأول . فالرمز المألوف فى الجبر س ح مثلا لا يدل على عدد معين ، ولا على جميع الأعداد بل ولا على فصل « الأعداد » . ويمكن أن نتبين هذا بسهولة من النظر إلى تطابق ما ، وليكن

$$(\text{س} + ١)^٢ = \text{س ح}^٢ + ٢\,\text{س ح} + ١$$

فهذه دون شك لا تدل على ما قد يحصل لو وضعنا بدل س ح العدد مثلا ٣٩١ ، ولو أنها تستلزم أن نتيجة مثل هذا الاستبدال يكون قضية صادقة . ولا تدل كذلك

على ما ينتج بدلا من س حين نضع فصل التصور العدد ، لأننا لا نستطيع أن نضيف ١ إلى هذا التصور . ولنفس السبب أيضا س لا تدل على التصور « أى عدد » ، إذ لا يمكن إضافة ١ إليه . وإنما تدل على الانفصال المتكون من الأعداد المختلفة ، أو على الأقل يمكن أن نأخذ هذه الوجهة من النظر على أنها صحيحة إجمالا [١] . عندئذ تكون قيم س هى حدود الانفصال ، وكل حد منها ثابت . هذه الحقيقة المنطقية البسيطة يلوح أنها تكوّن جوهر ما زعمه زينون من أن السهم ساكن دائما .

٣٣٣ ــ ولكن حجة زينون تشتمل على عنصر ينطبق بوجـــه خاص على المتواصلات . فى حالة الحركة ، تنكر الحجة وجود مثل هذا الشىء وهو « حالة » الحركة . فى الحالة العامة لمتغير متصل قد تؤخذ على أنها إنكار للانهائيات الصغر بالفعل . لأن اللانهائيات الصغر محاولة لأن تخلع على قيم متغير التغير الذى إنما ينتمى إليها وحدها . فإذا تأكد عندنا أن جميع قيم متغير مّا ثوابت ، أصبح من اليسير عند أخذ « أى » قيمتين من هذه القيم أن نتبين أن الفرق بينهما متناه دائما ويترتب على ذلك عدم وجود فروق لانهائية الصغر . فإذا كان س متغيرا قد يأخذ جميع القيم الحقيقية من ٠ إلى ١ عندئذ إذا أخذنا أى اثنتين من هذه القيم وجدنا أن الفرق بينهما متناه ، على الرغم من أن س متغير متصل . حقا قد يكون الفرق أصغر من الفرق الذى أخذناه ، ولكن إن صح هذا لكان مع ذلك متناهيا . والنهاية الدنيا للفروق الممكنة هى صفر ، ولكن جميع الفروق الممكنة متناهية ، وليس فى هذا أى ظل من التناقض . هذه النظرية الاستاتيكية للمتغير ترجع إلى الرياضيين ، وغيابها فى زمان زينون هو الذى أفضى به إلى افتراض استحالة التغير المتصل بدون حالة من التغير مما يتطلب اللانهائيات الصغر . والتناقض فى أن يكون الجسم موجودا حيث هو غير موجود .

٣٣٤ ــ آخر حجج زينون هى المقياس . وهى حجة وثيقة الشبه بحجة استخدمتها فى الباب السابق ضد أولئك الذين يعتبرون ء س ، ء ص مسافتين لحدود متعاقبة . وهى حجة إنما توجه كما بيّن الأستاذ نويل (المرجع السابق ١١٦)

---

(١) انظر الباب الثامن ، وبخاصة بند ٩٣ .

ضد أولئك الذين يتمسكون باللامنقسمات بين الامتدادات ، على حين نصبت الحجج السابقة للرد بما فيه الكفاية على أنصار الانقسام اللانهائى . ولنفرض مجموعة من الأوقات المنفصلة والمواضع المنفصلة ، حيث الحركة تقوم على أن الجسم فى وقت يكون فى أحد هذه المواضع المنفصلة ، وفى وقت آخر فى موضع آخر .

ثم تخيل ثلاثة خطوط متوازية مركبة من النقط ا ، ب ، حـ ، د ؛ اَ ، بَ ، حـَ ، دَ ؛ اً ، بً ، حـً ، دً على التوالى .

ا ب حـ د
. . . .
اَ بَ حـَ دَ
. . . .
اً بً حـً دً
. . . .

ا ب حـ د
. . . .
اَ بَ حـَ دَ
. . . .
اً بً حـً دً
. . . .

افرض أن الخط الثانى يحرك فى لحظة واحدة جميع نقطه إلى اليمين بموضع واحد ، على حين يحرك الخط الثالث جميع نقطه بموضع واحد إلى الشمال . عندئذ ولو أن اللحظة لا منقسمة إلا أن حـَ التى كانت فوق حـً وأصبحت الآن فوق اً لا بد أن تكون قد مرت بـ بً فى أثناء اللحظة . إذن اللحظة منقسمة ، خلافا للفرض . هذه الحجة هى فرضاً تلك التى أثبتُّ بها فى الباب السابق أنه إذا وجدت حدود متعاقبة إذن $\frac{\text{دص}}{\text{دس}} = \pm ١$ دائما ؛ أو بالأحرى هذه هى الحجة مأخوذةً مع لحظة مّا فيها $\frac{\text{دص}}{\text{دس}} = ٢$. ويمكن وضعها على النحو التالى : ليكن ص ، ط دالتين لـ س ، وليكن $\frac{\text{دص}}{\text{دس}} = ١$ ، $\frac{\text{دط}}{\text{دس}} = -١$. إذن $\frac{\text{د}}{\text{دس}}(\text{ص} - \text{ط}) = ٢$ ، مما يتناقض مع المبدأ القائل بأن قيمة كل مشتقة يجب أن تكون ± ١ . ويرد الأستاذ إفلين وهو من أنصار الامتدادات اللامنقسمة على الحجة بالصورة التى وضعها زينون ، بقوله إن اً ، بَ لا تمر إحداهما بالأخرى أصلا[١]. لأن اللحظات إذا كانت لا منقسمة — وهذا هو الفرض — فكل ما يمكننا

(١) Revue de Métaphysique et Marale, Vol. 1, p. 386.

قوله أنه عند اللحظة التى تكون فيها اَ فوق اً تكون عند اللحظة التالية حَ فوق اً ، ولم يحدث شىء بين اللحظتين . وأن نفرض أن اً ، بَ قد عبرا معناه أننا نثبت المطلوب برجوع مستتر لاتصال الحركة . وهذا الرد صحيح فيما أظن فى حالة الحركة . وكلا الزمان والمكان قد نذهب بغير تناقض إيجابى إلى أنهما منفصلان بالتمسك بدقة بالمسافات بالإضافة إلى الامتدادات . عندئذ تصبح الهندسة والكيماتيكا والديناميكا باطلة ، ولكن ليس ثمة سبب وجيه جدا للاعتقاد أنها صواب . أما فى حالة الحساب فالأمر مختلف ، إذ لا يتطلب أى سؤال تجريبى عن الوجود . وفى هذه الحالة كما نرى من الحجة السابقة عن المشتقات تكون حجة زينون سليمة تماماً . فالأعداد أشياء يمكن أن تقرر طبيعتها بلا نزاع . وصور الاتصال المتعددة التى تقع بين الأعداد لا يمكن إنكارها بغير تناقض إيجابى . ولهذا السبب كانت مناقشة مشكلة الاتصال فى ارتباطها بالأعداد أفضل من مناقشتها فى ارتباطها بالمكان والزمان والحركة .

٣٣٥ — رأينا أن حجج زينون ولو أنها تبرهن الشى الكثير لا تبرهن أن المتواصل كما نتعرف عليه لا يحوى أى متناقضات أيا كانت . ومنذ أيام زينون لم تتسلح الهجمات الموجهة ضد المتواصل فيما أعرف بأسلحة جديدة أو أقوى . فلم يبق أمامنا سوى أن نذكر بعض ملاحظات قليلة عامة .

الفكرة التى يخلع عليها كانتور اسم « المتواصل » قد تسمى بالطبع بأى اسم آخر من القاموس أو من خارجه ، وكل إنسان حر أن يقول إنه هو بالذات يعنى بالمتواصل شيئا مختلفاً كل الاختلاف . ولكن هذه المسائل اللفظية لا جدوى منها . إن فضل كانتور لا يقوم فى أنه عبر عما يعنيه غيره من الناس ، بل يقوم فى أنه يخبرنا ما يعنيه هو — وهى مزية تكاد تكون فريدة حيث يتعلق الأمر بالاتصال . فقد عرف بدقة وعزم فكرةً ترتيبية بحتة تخلو كما نرى الآن من المتناقضات ، وتكفى لجميع التحليل والهندسة والديناميكا . ولقد كانت هذه الفكرة مفروضة فى أساس الرياضيات الموجودة حينئذ ، ولو أنه لم يكن من المعروف بالضبط ما الذى كان مفروضاً . وقد نجح كانتور بوضوحه الذى لا يكاد يبارى فى تحليل الطبيعة الشديدة التعقيد للمتسلسلات المكانية التى بها كما سنرى فى الجزء السادس فتح الباب أمام ثورة فى فلسفة المكان والحركة. والنقط البارزة فى تعريف المتواصل هى (١)

الارتباط بمذهب النهايات (٢) إنكار القطع اللانهائية الصغر . فإذا أخذنا فى بالنا هاتين النقطتين ألقى الضوء على فلسفة هذا الموضوع بأسره .

٣٣٦ — إنكار القطع اللانهائية الصغر يحل نقيضةً ظلت عرضة للمهانة زمنا طويلا . وأعنى بهذه النقيضة أنّ المتواصل يشتمل ولا يشتمل على عناصر فى وقت واحد . ونحن نرى الآن أن كلا الأمرين ربما قيلا ولكن على معنيين مختلفين . فكل متواصل فهو متسلسلة يتكون من حدود ، والحدود إنْ كانت لا منقسمة فهى على أى حال ليست منقسمة إلى حدود جديدة من المتواصل . وبهذا المعنى يوجد فى المتواصل عناصر . أما إذا أخذنا حدوداً متعاقبة مع علاقتها اللامتماثلة باعتبار أنها تكوّن ما عساه أن يُسمى (ولو أن ذلك ليس بالمعنى المذكور فى الجزء الرابع) عنصرا ترتيبيا ، عندئذ لا يكون للمتواصل بهذا المعنى عناصر . فإذا أخذنا امتدادا على أنه متسلسل أساساً بحيث يجب أن يتكون من حدين على الأقل عندئذ لا توجد امتدادات أولية . وإذا كان المتواصل من النوع الذى فيه مسافة ، فكذلك لا توجد مسافات أولية . ولكن لا يوجد فى أى حالة من هاتين الحالتين أى أساس منطقى للعناصر . وتنشأ الحاجة إلى حدود متعاقبة كما رأينا فى الجزء الثالث من استخدام غير مشروع للاستنباط الرياضى . هذا وبالنسبة للمسافة ، فليست المسافات الصغيرة بأبسط من الكبيرة ، بل كلها كما رأينا فى الجزء الثالث بسيطة على حد سواء . ولا تفترض قبلا المسافات الكبيرة مسافات صغيرة ، لأنها من حيث إنها مقادير لا امتدادية ، ربما وجدت حيث لا توجد مسافات أصغر ألبتة . وعلى ذلك ، التراجع اللانهائى من مسافات أو امتدادات أكبر إلى أصغر هو من النوع الذى لا ضرر منه ، وفقدان العناصر لا يجب أن يحدث لنا أى انزعاج منطقى . وبناء على ذلك تحل النقيضة ، ويخلو المتواصل بتاتا على الأقل بمقدار ما أستطيع أن أتبين من المتناقضات .

ولم يبق إلا أن نبحث هل هذه النتيجة نفسها تصح بالنسبة للانهائى ؟ ، وهو بحث نسدل به الستار على الجزء الخامس من هذا الكتاب .

الباب الثالث والأربعون

فلسفة اللانهاية

٣٣٧ – اضطررنا فى مناقشاتنا السابقة للامتناهى إلى الخوض فى كثير من النقاط الرياضية بحيث لم تسنح لنا فرصة كافية لبحث الموضوع بحثا فلسفيا خالصا . وأود فى الباب الحاضر بعد اطراح الرياضيات أن أبحث فى فكرة اللامتناهى هل يمكن أن نجد فيها أى تناقض ؟ .

كقاعدة عامة لم ير أولئك الذين اعترضوا على اللانهاية أنها مما يجدر الوقوف عندها لعرض ما فيها من متناقضات مضبوطة ، إلى أن جاء كانط وفعل ذلك ، فكان ذلك من أعظم حسناته . والنقيضة الرياضية الثانية المتعلقة أساساً بالمتواصل أله عناصر أو لا ، فقد حلت فى الباب السابق بافتراض أنه ربما وُجد اللامتناهى بالفعل – أى أنها حُلت بردها إلى مسألة العدد اللامتناهى. والنقيضة الأولى تتعلق باللامتناهى ولكن بصورة زمانية أساساً . لذلك لم يكن لهذه النقيضة مدخل بالنسبة للحساب إلا على رأى كانط من أن الأعداد يجب أن تتشكل فى زمان . ويؤيد هذا الرأى بالحجة القائلة بأننا نقطع زمنا فى العد ، وإذن بغير زمان لا يتسنى لنا معرفة عدد أى شىء . وبهذه الحجة نستطيع البرهنة على أن المعارك الحربية تقع دائما على مقربة من أسلاك البرق . لأنه لو وقع الأمر على خلاف ذلك ما سمعنا عنها شيئا . الواقع نستطيع أن نثبت بوجه عام أننا نعرف ما نعرفه . ولكن يبقى موضع نظر أننا لا نعرف ما لا نعرفه . ومن ثم تبقى الضرورة إلى الزمان ولم يقم عليها برهان .

أما غير كانط من الفلاسفة. فقد فحصنا عن أمر زينون فى علاقته بالمتواصل، وسنبحث التناقض الذى يقوم فى أساس حجة أخيل والسلحفاة بعد قليل . ومحاورة « بارمنيدس » لأفلاطون – ولعلها أفضل مجموعة من النقائض كتبت حتى الآن – فلا مدخل لها ههنا لأنها تدور حول صعوبات أساسية أكثر مما له صلة باللانهاية . أما هيجل فإنه لم يزل ينبه على كل كبيرة وصغيرة حتى إذا أعلن منبها عن تناقض

لم نعد نحفل بذلك . وأما عن ليبنتز فهو كما رأينا يجعل التناقض القائم فى أساس حجة أخيل ترابط الواحد بالواحد للكل والجزء . الواقع هذه هى النقطة الوحيدة التى تدور حولها معظم الحجج المناهضة اللانهاية . وسأضع فيما يلى الحجج فى صورة ملائمة لمعرفتنا الرياضية الحاضرة ، وهذا يمنعنى من اقتباس تلك الحجج عن أى واحد من قدماء المعارضين للانهاية .

٣٣٨ — ولنشرع أولا فى عرض موجز للنظرية المثبتة للانهاية التى انتهى بنا الأمر إلى النظر فيها . إذا سلمنا بفكرة « القضية » و « مكون قضية » على أنهما من اللامعرفات ، أمكن أن ندل بالرمز ϕ (ا) على قضية ا أحد مكوناتها . نستطيع بعد ذلك أن نحول ا إلى متغير س ، ونعتبر ϕ (س) ، حيث ϕ (س) أى قضية مختلفة عن ϕ (ا) إن لم يكن اختلافا تاماً فيكفى أن شيئا آخر ما يظهر فى موضع ا : هذا و ϕ (س) هى التى سميناها دالة قضية . سيحدث بوجه عام أن ϕ (س) صادقة لبعض قيم س وكاذبة لبعضها الآخر . وجميع قيم س التى تصدق عليها ϕ (س) تكون ما سميناه « الفصل » المعرف بـ ϕ (س) . على ذلك كل دالة قضية تعرف فصلا ، والإحصاء الفعلى لأعضاء الفصل ليس ضروريا لتعريفه . ثم نستطيع بدون الإحصاء أن نعرف تشابه فصلين : يكون فصلان ى ، ف متشابهين عند وجود علاقة واحد بواحد ع بحيث « س هى أحد ى » تستلزم دائما أن « هناك أحد ف له مع س العلاقة ع » و « ص هى أحد ف» تستلزم دائما أن « هناك أحد ى له مع ص العلاقة ع » . وبعد ذلك ع علاقة واحد بواحد إذا كانت س ع ص ، س ع ط يستلزمان دائما معاً تطابق ص مع ط ، س ع ط ، ص ع ط معاً تستلزمان دائما تطابق س مع ص . وتعرف « س متطابقة مع ص » بأنها تعنى : « كل دالة قضية تصح على س تصح كذلك على ص » . ونعرف الآن العدد الأصلى لفصل ما ى بأنه فصل جميع الفصول المشابهة لـ ى . وكل فصل فله عدد أصلى ما دام « ى مشابه لـ ف » دالة قضية لـ ف إذا كان متغيرا . علاوة على ذلك ى نفسه عضو فى عدده الأصلى ما دام كل فصل متشابها مع نفسه . ويجب ملاحظة أن التعريف المذكور للعدد الأصلى يقوم على فكرة دوال القضايا ولا يتطلب الإحصاء فى أى مكان . وبناء على ذلك ليس ثمة سبب لافتراض وجود أى صعوبة بالنسبة

لأعداد الفصول التى لا يمكن عد حدودها بالطريقة المعتادة الابتدائية . والفصول يمكن أن تقسم إلى نوعين بحسب ما تكون شبيهة بأجزاء صحيحة بذاتها أو لا تكون ، فنى الحالة الأولى تسمى لا متناهية ، وفى الحالة الثانية متناهية . ويسمى عدد الفصل المعرف بدالة قضية كاذبة دائما صفرا (٠) ؛ أما ١ فيعرف بأنه عدد فصل مـّا ى ، ويكون فيه حد مـّا س ينتمى ا ى ، بحيث إن « ص هو أحد ى وتختلف ص عن س » كاذبة دائما . فإذا كان ن أى عدد ، عرف ن + ١ بأنه عدد الفصل ى الذى س عضو فيه بحيث أن دالة القضية « ص هو أحد ى وتختلف ص عن س » تعرف فصلا عدده ن . فإذا كان ن متناهيا ، كان ن + ١ مختلفا عن ن ، وإلا فلا . بهذه الطريقة إذا بدأنا من ٠ حصلنا على متوالية من أعداد ، ما دام ن يؤدى إلى عدد جديد هو ن + ١ . ومن السهل إثبات أن جميع الأعداد المنتمية للمتوالية التى تبدأ من ١ وتتولد بهذه الطريقة فهى مختلفة ، وبعبارة أخرى إذا انتمى ن لهذه المتوالية ، وكان م أحد سوابقها ، فالفصل المكون من ن من الحدود لا يمكن أن يكون له ترابط واحد بواحد مع م من الحدود . والمتوالية المعرّفة على هذا النحو هى متسلسلة « الأعداد المتناهية » . ولكن لا يوجد أى سبب للظن بأن جميع الأعداد يمكن تحصيلها بهذه الطريقة . حقا يمكن إعطاء برهان صورى على أن عدد الأعداد المتناهية ذاتها لا يمكن أن يكون حدا فى متوالية الأعداد المتناهية . والعدد الذى لا ينتمى لهذه المتوالية يسمى « لامتناهيا » . والبرهان على أن ن ، ن + ١ عددان مختلفان يعتمد على هذه الحقيقة وهى أن ٠ ، ١ أو ١ ، ٢ أعداد مختلفة وذلك بواسطة الاستنباط الرياضى ؛ فإذا لم يكن ن ، ن + ١ حدين فى هذه المتوالية لم يصح البرهان ، وأكثر من هذا هناك برهان مباشر على العكس . ولكن ما دام البرهان السابق كان معتمدا على الاستنباط الرياضى ، فلا يوجد أى سبب يمنع من إطلاق النظرية على الأعداد اللامتناهية . فالأعداد اللامتناهية لا يمكن التعبير عنها كالأعداد المتناهية بطريقة النظام العشرى ، ولكن يمكن تمييزها بالفصول التى تنطبق عليها . وحيث إن الأعداد المتناهية قد عرفت كلها بالمتوالية المذكورة ، فإذا كان فصل مـّا ى له حدود ولكنها ليست أى عدد متناه من الحدود فله عندئذ عدد لا متناه وهذه هى النظرية الموجبة للأنهاية .

٣٣٩ ــ وجود فصول لامتناهية يبلغ من الوضوح حداً يصعب معه إنكارها . ولما كانت قابلة للبرهان الصورى فقد يحسن البرهنة عليها . وهناك برهان بسيط جداً نجده فى محاورة بارمنيدس ، وهو كما يأتى : إذا سلمنا بوجود العدد ١ ، عندئذ هذا العدد له « وجود » ، وإذن هناك وجود . ولكن ١ والوجود اثنان ، حينئذ هناك عدد ٢ ، وهكذا . من الناحية الصورية لم نبرهن على أن ١ عدد الأعداد ولكننا نبرهن على أن ن هو عدد الأعداد من ١ إلى ن ، وأن هذه الأعداد مأخوذة مع الوجود تكوّن فصلا له عدد متناه جديد بحيث ن ليس عدد الأعداد المتناهية . إذن ١ ليس عدد الأعداد المتناهية ، وإذا كان ن ـــ ١ ليس عدد الأعداد المتناهية فليس ن كذلك أيضاً. حينئذ الأعداد المتناهية محوية كلها بالاستنباط الرياضى فى فصل الأشياء التى ليست عدد الأعداد المتناهية . وما دامت علاقة التشابه منعكسة بالنسبة للفصول ، فكل فصل له عدد . إذن فصل الأعداد المتناهية له عدد من حيث إنه ليس متناهياً فهو لامتناه . وهناك برهان أفضل من السابق مشتق من هذه الحقيقة وهى : أنه إذا كان ن أى عدد متناه ، فعدد الأعداد من ٠ إلى ن بما فيها ن هو ن + ١ ، ويترتب على ذلك أن ن ليس عدد الأعداد . ويمكن البرهنة على ذلك مباشرة بترابط الكل والجزء بقولنا إن عدد القضايا أو التصورات لامتناه [١] . لأنه لكل حد أو تصور فكرة تختلف عما هى فكرة له ، ولكنها أيضاً حد أو تصور . ومن جهة أخرى ليس كل حد أو تصور فكرة . فهناك مناضد ، وأفكار عن المناضد ، وهناك أعداد ، وأفكار عن الأعداد ، وهكذا . إذن توجد علاقة واحد بواحد بين الحدود والأفكار ، ولكن الأفكار إنما هى بعض حدود فقط من جميع الحدود . إذن هناك عدد لامتناه من الحدود والأفكار [٢] .

٣٤٠ ــ يجب الاعتراف بأن احتمال أن يكون للكل والجزء نفس عدد الحدود أمر يصدم بداهة الفطرة السليمة . وحجة أخيل التى ساقها زينون تبين ببراعة أن وجهة النظر المقابلة لها كذلك نتائج شنيعة. لأنه إن لم يمكن أن يترابط الكل والجزء حداً بحد

---

(١) انظر **Bolzano** *Paradoxien des Unendlichen*, § 13: Dedekind, *Was sind und was sollen die* **zahlen?** No. 66

(٢) ليس من الضرورى أن نفترض أن أفكار جميع الحدود « موجودة » ، أو تكون جزءاً من ذهن ما ، بل يكفى أنها أشياء entities .

ترتب على ذلك بلا نزاع أنه إذا سارت نقطتان ماديتان في نفس الطريق بحيث تتبع إحداهما الأخرى ، فالنقطة المتخلفة لن تدرك أبداً المتقدمة . فإن أدركتها فلا بد أن يكون عندنا بفرض الترابط الآنى للأوضاع تناظر وحيد ومنعكس بين جميع حدود الكل وبين جميع حدود الجزء . وعندئذ تصبح الفطرة السليمة فى موقف لا تحسد عليه ، إذ عليها أن تختار بين متناقضة paradox زينون ومتناقصة كانتور وليس فى نيتى تأييد المغالطة لأننى أعتبر أنها ينبغى أن تتوارى فى مواجهة البراهين . ولكننى سأعطى متناقضة كانتور صورة تشبه صورة متناقضة زينون . نحن نعرف أن ترسترام شاندى[1] Tristram Shandy استغرق عامين فى كتابة تاريخ أول يومين فى حياته ، وأخذ يندب قائلاً إنه بهذه السرعة تتجمع عنده المادة بأسرع مما يستطيع أن يبحثها ، وبذلك لن يصل إلى نهاية . وسأذهب إلى أنه لو عاش إلى الأبد دون أن يمل عمله ، إذن حتى إذا كانت حياته قد استمرت مملوءة بالحوادث كما بدأت ما بقى أى جزء من سيرته دون كتابة . هذه المتناقضة paradox التى تترابط كما سأبين تماماً مع متناقضة أخيل يمكن أن تسمى على سبيل التيسير بمتناقضة ترسترام شاندى .

وفى الحالات التى من هذا القبيل لن يكون جهدنا فى جعل الحجة صورية فضلا زائداً . ولذلك سأضع كلا متناقضتى أخيل وترسترام فى هيئة منطقية دقيقة .

ا — (١) يوجد لكل وضع من أوضاع السلحفاة وضع واحد لا غير لأخيل ؛ ولكل وضع لأخيل وضع واحد لا غير للسلحفاة .

(٢) إذن متسلسلة الأوضاع التى يشغلها أخيل لها نفس عدد الحدود مثل متسلسلة الأوضاع التى تشغلها السلحفاة .

(٣) الجزء له حدود أقل من الكل الذى يشتمل على الجزء ولا يكون متمادياً معه.

(٤) إذن متسلسلة الأوضاع التى تشغلها السلحفاة ليست جزءاً صحيحاً من متسلسلة الأوضاع التى يشغلها أخيل .

ب — (١) ترسترام شاندى يكتب فى سنة حوادث يوم .

---

(١) قصة مشهورة للقصصى لورانس سترن sterne كتبها بين ١٧٦٠ — ١٧٦٧ — وترسترام اسم بطل القصة مأخوذ من ترسيا جستوس Trismegistus أى المثلث الحكمة . وذلك للسخرية به ، وفى القصة نسمع عن ترسترام قبل مولده أكثر مما نسمع بعد مولده واطلاعه على العالم . (المترجم)

(٢) متسلسلة الأيام والسنين ليس لها حد أخير .

(٣) حوادث اليوم النونى تكتب فى السنة النونية .

(٤) أى يوم معين فهو اليوم النونى لقيمة مناسبة لـ ن .

(٥) إذن أى يوم معين سيكتب عنه .

(٦) إذن لن يبقى أى جزء من سيرة الحياة غير مكتوب .

(٧) لما كان هناك ترابط واحد بواحد بين أوقات الحوادث وأوقات الكتابة ، وكانت الأولى جزءاً من الثانية ، فالكل والجزء لهما نفس عدد الحدود .

ولنشرع فى صياغة هذين التناقضين بأكثر ما يمكن من التجريد ، فنقول : ليكن ى متسلسلة ملتحمة من أى نوع ، وليكن س متغيراً يمكن أن يأخذ جميع القيم فى ى بعد قيمة معنية سنسميها ٠ ؛ وليكن د (س) دالة أحادية القيمة لـ س ، و س دالة أحادية القيمة لـ د (س) ؛ كذلك ليكن جميع قيم د (س) منتمية لـ ى ، عندئذ تجرى الحجج على النحو الآتى :

ا ــ ليكن د (٠) حداً سابقاً على ٠ ؛ وليكن د (س) تكبر كلما كبرت س ، أى إذا كانت س و س َ (حيث و العلاقة المولدة) فليكن د (س) و د (س َ). ثم ليكن د (س) تأخذ جميع القيم فى ى المتوسطة بين أى قيمتين من قيم د (س) . عندئذ إذا أعطينا س قيمة ما ا بحيث يكون ٠ و ا ، حصلنا على د (ا) = ا ، إذن متسلسلة قيم د (س) ستكون جميع الحدود من د (٠) إلى ا ، بينما متسلسلة قيم س ستكون فقط الحدود من ٠ إلى ا التى هى جزء من تلك الحدود من د (٠) إلى ا . وإذن فأن تفترض أن د (ا) = ا هو أن تفترض علاقة واحد بواحد وحد بحد للكل والجزء . وهذا ما يقول زينون والفطرة السليمة باستحالته .

ب ــ ليكن د (س) دالة تكون ٠ عند ما تكون س ٠ ، وتكبر بانتظام كلما كبرت س ، من حيث إن متسلسلتنا من المتسلسلات التى يوجد فيها قياس . عندئذ إذا أخذت س جميع القيم بعد ٠ فكذلك تأخذ د (س) ؛ وإذا أخذت د (س) جميع مثل تلك القيم ، فكذلك تأخذ س . إذن فصل قيم إحداهما مطابق لفصل قيم الأخرى . ولكن إذا كان فى أى وقت قيمة س أكبر من قيمة د (س) ، ما دامت د (س) تكبر بسرعة منتظمة ، إذن س ستكون دائماً أكبر من د (س) .

وعلى ذلك لأى قيمة معينة لـ سـ يكون فصل قيم د (سـ) من ٠ إلى د (سـ) جزءاً صحيحاً من قيم سـ من ٠ إلى سـ . ومن ثم نستطيع أن نستنتج أن جميع قيم د (سـ) كانت جزءاً صحيحاً من جميع قيم سـ ، وقد رأينا أن هذا باطل .

هاتان المتناقضتان مترابطتان ، وكلاهما بالإشارة إلى القطع يمكن تقريرها بصيغة النهايات . حجة أخيل تبرهن على أن متغيرين فى متسلسلة متصلة يبلغان التساوى من نفس الجهة ، فلا يمكن أبداً أن يكون لهما نهاية مشتركة . وتبرهن حجة ترسترام أن المتغيرين اللذين يبدآن من حد مشترك ويسيران فى نفس الاتجاه ولكن يتباعدان أكثر فأكثر ، قد يحددان مع ذلك الفصل النهائى . (الذى ليس من الضرورى أن يكون قطعة لأن القطع عُرِّفت بأن لها حدوداً وراء نفسها) . حجة أخيل تفترض أن الكل والجزء لا يمكن أن يتشابها ، وتستنبط من ذلك متناقضة ، والحجة الأخرى تبدأ من قول متهافت وتستنتج من ذلك أن الكل والجزء قد يتشابهان . ولا بد لنا من الاعتراف أن هذه الحالة فى نظر الفطرة السليمة من أسوأ الأمور .

٣٤١ ـ لا يوجد أدنى شك أى الطرق هو الصحيح ، إذ ينبغى رفض حجة أخيل بسبب تناقضها مباشرة مع الحساب ، وحجة ترسترام لا بد من قبولها ما دامت لا تتطلب البديهية القائلة بأن الكل لا يمكن أن يكون متشابهاً مع الجزء . وهذه البديهية كما رأينا جوهرية فى برهان أخيل ، وهى بلا ريب بديهية تستسيغها الفطرة السليمة . ولكن لا دليل على البديهية سوى الوضوح الذاتى المزعوم ، والتسليم بها يفضى إلى متناقضات دقيقة تماماً . وليست البديهية عديمة الجدوى فقط ، ولكنها هادمة إيجابياً فى الحساب ، ولا شىء يقف فى سبيل رفضها سوى التحيز السابق . ومن أهم مزايا البراهين أنها تشيع ضرباً من الشك بالنسبة للنتيجة المبرهن عليها . فلم نكد نرى أن تشابه الكل والجزء يمكن البرهنة على استحالته لكل كلّ متناه[1] ، حتى لم يصبح من المستهجن أن نفترض ذلك بالنسبة للكلات اللامتناهية ، أما حيث نعجز عن البرهنة على الاستحالة ، فلم تكن هناك فى الواقع مثل هذه الاستحالة . الواقع بالنسبة للأعداد التى نتعامل بها فى حياتنا اليومية ـ فى

---

(١) المتناهى معرفاً هنا بالاستنباط الرياضى لتجنب التكرار

الهندسة ، أو الفلك ، أو الحسابات ، حتى حسابات روكفلر أو وزير الخزانة ، فإن تشابه الكل والجزء مستحيل . وعلى ذلك كان افتراض استحالته دائماً سهل التفسير . ولكن الافتراض يعتمد على أساس لا يفضل بتاتاً ذلك الذى كان يعتمد عليه فلاسفة أواسط أفريقيا من أن جميع الناس زنوج .

٣٤٢ – ولبيان الفرق بين الكلات المتناهية واللامتناهية قد يحسن أن نشير إلى أن الكل والجزء حدان يقبلان تعريفين حيث يكون الكل متناهياً ، ولا يقبلان إلا أحد هذين التعريفين فقط على الأقل عملياً حيث يكون الكل لامتناهياً [١] . والكل المتناهى قد يؤخذ جملة collectively ، كهذه الأفراد وتلك ، مثلا ا ، ب ، حـ ، ء ، هـ . وقد نحصل على جزء من هذا الكل بعد بعض لا كل الحدود المكونة للكل . وهذه الطريقة يكون الفرد المفرد جزءاً من الكل ، ولا حاجة إلى أخذ الكل أو الأجزاء كفصلين ، بل كل منهما قد يعرف با لماصدق ، أى بعد الأفراد . ومن جهة أخرى الكل والأجزاء قد يعرف كلاهما بالمفهوم ، أى بفصل التصورات . فنحن نعرف بغير عد أن الإنجليز جزء من الأوربيين ، لأن كل إنجليزى فهو أوربى ، ولكن ليس العكس . ولو أن هذا الأمر يمكن تقريره بالعد ولكن لا ضرورة لتقريره على هذا النحو . فإذا بحثنا فى الكلات اللامتناهية يختفى هذا التعريف المزدوج ، ولا يبقى فقط إلا التعريف بالمفهوم . والكل والأجزاء يجب أن يكون كلاهما فصولا ، ويجرى تعريف الكل والجزء بواسطة فكرتى المتغير واللزوم المنطقى . فإذا كان ا فصل تصور ، كان أحد أفراد ا حداً له مع ا تلك العلامة المتخصصة التى نسميها فصل العلاقة . والآن إذا كان ب فصلا آخر بحيث إنه لجميع قيم سـ « سـ هو أحد ا » تستلزم « سـ هو أحد ب » عندئذ ما صدق (أى المتغير سـ) يقال إنه « جزء » من ما صدق ب [٢] . فههنا لا حاجة إلى عد الأفراد ، ولم يعد لعلاقة الكل والجزء ذلك المعنى البسيط الذى كان له حيث يتصل الأمر بالأجزاء المتناهية . فأن نقول الآن إن ا ، ب متشابهان كأننا نقول بوجود علاقة واحد بواحد ما ع تحقق الشروط الآتية : إذا كان سـ أحد ا ، فهناك حد صـ فى الفصل ب بحيث سـ ع صـ . فإذا كان صـَ أحد ب ، فهناك حد سـَ

---

(١) انظر الفقرة : ٣٣ .

(٢) انظر peano, *Rivista di Matematica*, VII, or *Formulaire*, Vol. II, Part I.

فى الفصل ا بحيث سـ ع صـ . ومع أن ا جزء من ب . فمثل هذه الحالة من الأمور إنما يبرهن عليها بالعد ، وليس ثمة سبب لافتراض أن العد ممكن . وتعريف الكل والجزء بغير عد هو مفتاح هذه المشكلة الغامضة بأسرها . والتعريف المذكور سابقاً والذى يرجع إلى بيانو هو التعريف المنطبق طبيعياً وضرورةً على الكلات اللامتناهية . مثال ذلك أن الأعداد الأولية جزء صحيح من الأعداد الصحيحة ، ولكن لا يمكن إثبات ذلك بالعد ، بل نستنتجه من الآتى ، « إذا كان سـ عدداً أولياً ، كان سـ عدداً » و « إذا كان سـ عدداً فلا يترتب على ذلك أن سـ عدد أولى » . أما أن فصل الأعداد الأولية يجب أن يكون مشابهاً لفصل الأعداد إنما يلوح مستحيلاً بسبب أننا نتخيل أن الكل والجزء يعرفان بالعد . حتى إذا تحررنا من هذه الفكرة تلاشى التناقض المفروض .

٣٤٣ — من المهم جداً أن نتحقق بالنسبة إلى ω أو ا. أنه ولا واحد منهما له عدد يسبقه مباشرة . وهذه الخاصية يشتركان فيها مع كافة النهايات ، لأن نهاية المتسلسلة لا تبسق أبداً مباشرة بأى حد من المتسلسلة التى هى نهاية لها . ولكن ω هو بمعنى مّا متقدم منطقياً على النهايات الأخرى ، لأن الأعداد الترتيبية المتناهية مأخوذة مع ω معاً تقدم الصنف الصورى لمتوالية مأخوذة مع نهايتها ، فإذا غاب عنا أن ω ليس له سابق مباشر برزت جميع ضروب المتناقضات ؛ ولنفرض ن العدد الأخير قبل ω ؛ عندئذ ن عدد متناه ، وعدد الأعداد المتناهية هو ن + ١ . الواقع قولنا بأن ω ليس له سابق إنما هو مجرد قولنا إن الأعداد المتناهية ليس لها حد أخير . ومع أن ω يكون مسبوقاً بجميع الأعداد المتناهية ، فإنه ليس مسبوقاً مباشرة بأى واحد منها : فلا عدد بعد ω . وأعداد كانتور المتصاعدة لها خاصة أنها مع وجود عدد هو الما بعد عدد معين ، فلا يوجد دائماً عدد هو الما قبل . وهكذا يلوح أنه ثمة فجوات فى المتسلسلة . خذ مثلا المتسلسلة ١ ، ٢ ، ٣ . . . . ن . . . . . التى تكون لامتناهية وليس لها حد أخير . ثم متسلسلة أخرى ω ، ω + ١ ، ω + ٢ . . . . ω + ن ، . . . التى تساوى الأولى فى أنها لامتناهية وليس لها حد أخير . هذه الثانية تأتى تماماً بعد المتسلسلة الأولى ، ولو أنه لا حدّ من الأولى يتلوω مباشرة . هذه الحالة من الأمور يمكن أن توازيها متسلسلة ابتدائية جداً . مثل المتسلسلة التى حدودها العامة هى ١ — $\frac{1}{ن}$

٢ – $\frac{1}{n}$ حيث ن قد يكون أى عدد صحيح متناه . والمتسلسلة الثانية تأتى كلها بعد الأولى ، ولها حد أول معين هو ١ . ولكن لا يوجد أى حد فى المتسلسلة الأولى يسبق مباشرة ١ . كل ما هو لازم لكى تأتى المتسلسلة الثانية بعد الأولى ، هو أن يكون هناك متسلسلة ما تحوى كليهما . فإذا أطلقنا اسم « الجزء الترتيبى » لمتسلسلة على أى متسلسلة يمكن الحصول عليها بحذف بعض حدود متسلسلتنا دون تغيير ترتيب الحدود الباقية ، عندئذ تكوّن الترتيبات المتناهية والمتصاعدة جميعاً متسلسلة واحدة علاقتها المولّدة هى علاقة الكل والجزء الترتيبين بين المتسلسلة التى تنطبق عليها الترتيبات المتعددة . فإذا كان ن أى ترتيبى متناه كانت المتسلسلات من الصنف ن أجزاء ترتيبية من متواليات . وبالمثل كل متسلسلة من الصنف ω + ١ تحوى متوالية كجزء ترتيبى . والعلاقة « جزء ترتيبى » ordinal part متعدية ولا متماثلة ، وهكذا تنتمى الترتيبات المتناهية والمتصاعدة جميعاً لمتسلسلة واحدة . ووجود ω (بالمعنى الرياضى للوجود) ليس عرضة للسؤال ، ما دام ω هو صنف الترتيب المقدم بالأعداد الطبيعية ذاتها . وإنكار ω معناه إثبات وجود عدد متناه أخير – وهى نظرة تؤدى كما رأينا فوراً إلى متناقضات لا شك فيها ، فإذا سلمنا بذلك ، كانت ω + ١ هى صنف متسلسلة الترتيبات المتضمنة ، أى المتسلسلة التى حدودها هى جميعاً متسلسلة الأعداد الصحيحة من ١ إلى أى عدد متناه مأخوذة مع كل متسلسلة الأعداد الصحيحة ، ومن ثمّ يسهل نشوء جميع السلم اللانهائى للأعداد المتصاعدة .

٣٤٤ – الاعتراضات العادية على الأعداد اللامتناهية ، والفصول ، والمتسلسلات ، والفكرة القائلة بأن اللامتناهى من حيث هو كذلك متناقض بذاته ، يمكن بذلك أن تستبعد على أنها لا أساس لها . ومع ذلك تتبقى صعوبة عسيرة جداً مرتبطة بالتناقض الذى ناقشناه فى الباب العاشر ، هذه الصعوبة لا تتعلق باللامتناهى من حيث هو كذلك ، بل فقط ببعض فصول لامتناهية كبيرة جدّاً . اختصار القول يمكن تقرير الصعوبة على النحو الآتى : أعطى كانتور برهاناً [1] على أنه لا يمكن وجود عدد أصلى هو الأكبر ؛ فإذا فحصنا هذا البرهان رأيناه يقرر أنه إذا كان ى فصلا ، كان عدد الفصول المحوية فى ى أكبر من عدد حدود ى ، أو

---

(١) الواقع أعطى كانتور برهانين ، ولكننا سنجد أن أحدهما ليس مقنعاً .

(وهو ما يكافئه) إذا كان ا أى عدد ، كان ٢ ا أكبر من ا . ولكن هناك بعض الفصول من السهل أن نعطى بشأنها برهاناً ظاهر الصحة على أن فيها أكثر ما يمكن من الحدود . وهذه هى مثل فصل جميع الحدود ، أو فصل جميع الفصول ، أو فصل جميع القضايا . وهكذا يلوح كما لو أن برهان كانتور كان ينبغى أن يشتمل على افتراض ما لم يتحقق فى حالة مثل هذه الفصول . ولكن عند ما نطبق استدلال برهانه على الحالات المذكورة ، نرى أننا نصدم بتناقضات معينة أحدها ما ناقشناه فى الباب العاشر مما يعد مثلا عليها [1] . وتنشأ الصعوبة حيثما نحاول البحث فى فصل جميع الأشياء بالإطلاق ، أو بأى فصل يساويه فى كثرة العدد ولكن بالنسبة لصعوبة مثل هذه الوجهة من النظر ، قد نميل إلى القول بأن تصور جملة الأشياء ، أو كل عالم الأشياء والموجودات ، أمر من بعض الوجوه غير مشروع ، ومخالف بالذات للمنطق . ولكن ليس من المرغوب فيه اتخاذ مثل هذا الإجراء اليائس ما دام هناك أمل فى إيجاد حل أكثر تواضعاً .

ولنبدأ بقولنا : إننا قد نلاحظ أن فصل الأعداد ليس– كما عسى أن يفترض– أحد الفصول التى تقع فيها الصعوبات ، إذ بين الأعداد المتناهية ، إذا كان ى عدد الأعداد ، وجب استنتاج أن ى – ١ أكبر الأعداد ، وإذن لا يوجد عدد ى على الإطلاق . ولكن هذه خاصية للأعداد المتناهية . وعدد الأعداد إلى ا. ومشتملا عليه هو ا. ، ولكن هذا أيضاً هو عدد الأعداد إلى βا ومشتملا عليه ، حيث β أى عدد ترتيبى أو أى ترتيبى متناه ينطبق على متسلسلة معدودة محكمة الترتيب . وعلى ذلك عدد الأعداد إلى ا ومشتملا عليه . هو عادة أصغر من ا حيث ا عدد لا متناه . وليس ثمة سبب لافتراض أن عدد جميع الأعداد هو أكبر عدد . فعدد الأعداد ربما كان أصغر من أكبر عدد ، ولا ينشأ أى تناقض من هذه الحقيقة (إنْ كانت هذه حقيقة) وهى أن عدد الأفراد أكبر من عدد الأعداد .

ولكن مع أن فصل الأعداد لا يسبب أى صعوبة فهناك فصول أخرى من الصعب جداً البحث فيها . ولنبدأ أولا بفحص براهين كانتور من أنه لا يوجد

---

(١) بهذه الطريقة اكتشفت هذا التناقض ، وقد أعطيت تناقضاً شبيهاً بذلك فى آخر هذا الكتاب فى الملحق ب .

عدد أصلى هو الأكبر ، ثم نناقش الحالات التى تنشأ فيها المتناقضات .

٣٤٥ – فى أول براهين كانتور [١] ، تعتمد الحجة على الحقيقة المفروضة من أن هناك تناظر واحد بواحد بين الترتيبيات والأصليات [٢] . فقد رأينا عند النظر فى عدد أصلى من متسلسلة من الصنف الذى يمثله أى عدد ترتيبى ، أن عدداً لامتناهياً من الترتيبيات يناظر عدداً أصلياً واحداً – مثال ذلك جميع الترتيبات من الفصل الثانى التى تكوّن مجموعة غير معدودة ، تناظر العدد الأصلى المفرد ا . ولكن هناك طريقة أخرى للترابط فيها ترتيبى واحد فقط يناظر كل أصلى . هذه الطريقة تنتج من اعتبار متسلسلة الأصليات نفسها . فى هذه المتسلسلة ، ا. يناظر ω ، ا١ يناظر ω + ١ ، وهكذا . فهناك دائماً ترتيبى واحد لا غير يصف صنف المتسلسلة التى تقدمها الأصليات من ٠ إلى أى واحد منها . ويلوح أننا نفترض ضمناً وجود أصلى لكل ترتيبى . وأنه لا فصل يمكن أن يكون له هذا العدد الكثير من الحدود . بحيث ولا متسلسلة محكمة الترتيب يمكن أن يكون لها عدد أكبر من الحدود . أما أنا فلا أرى أى أسباب لتأييد أى الفرضين ، وأرى أسباباً معينة لرفض الثانى . لأن كل حد فى متسلسلة يجب أن يكون فرداً . ويجب أن يكون فرداً مختلفاً (وهى نقطة لا يلتفت إليها غالباً) عن كل فرد آخر من المتسلسلة . يجب أن يكون مختلفاً . لأنه لا توجد أى أمثلة لفرد : فكل فرد فريد بالإطلاق ، وبطبيعة الحال واحد فقط . ولكن حدان فى متسلسلة فهما اثنان ، فليسا إذن فرداً واحداً بالذات. هذه النقطة الهامة تكون غامضة لأننا كقاعدة لانصف وصفاً كاملا حدود متسلسلتنا . فحين نقول : لتكن متسلسلة ا ، ب ، حـ ، د ، ب ، د ، هـ ، ا ، حيث تتكرر حدود على فترات – مثل المتسلسلة التى تقدمها الأرقام فى النظام العشرى – ننسى النظرية القائلة بأنه حيث يوجد تكرار إنما يمكن أن

(١) Mannichfaltigkeitslehre, p. 44.

(٢) انظر ما سبق الباب الثامن والثلاثين بند ٣٠٠ .

نحصل على متسلسلتنا بالترابط ، ومعنى ذلك أن الحدود ليس لها بذاتها ترتيب ، ولكن لها علاقة واحد بكثير (لا واحد بواحد) مع الحدود التى لها ترتيب [١] . وعلى ذلك إذا رغبنا فى الحصول على متسلسلة حقيقية genuine فيجب إما أن نرجع إلى المتسلسلة التى تترابط معها حدودنا ، وإما أن نكون الحدود المركبة المؤلفة من تلك الحدود فى المتسلسلة الأصلية ومن تلك المتسلسلة المترابطة فى أزواج . ولكن لا يوجد تكرار فى أى من هاتين المتسلسلتين . وعلى ذلك كل عدد ترتيبى يجب أن يناظر متسلسلة من الأفراد تختلف كل واحدة منها عن الأخرى . وقد يشك هل تكوّن جميع الأفراد متسلسلة أصلا . أما أنا فلا أستطيع تبين أى علاقة متعدية لا متماثلة تقوم بين كل زوج من الحدود . حقًا يعتبر كانتور أن كل مجموعة معينة يمكن أن تجعل محكمة الترتيب ، على أن ذلك قانون من قوانين الفكر ، ولكن لا أرى أساساً لهذا الرأى . ومع ذلك فإذا أجزنا هذه الوجهة من النظر سيكون للترتيبات نهاية عليا maximum معينة تماماً ، وهى ذلك الترتيبى الذى يمثل صنف المتسلسلة المكوّنة من جميع الحدود بدون استثناء [٢] . فلو أن مجموعة كل الحدود لم تكن تكوّن متسلسلة ، فمن المستحيل إثبات ضرورة وجود ترتيبى هو الأعلى maximum ordinal، الذى توجد على كل حال أسباب لإنكاره [٣] . ولكن فى هذه الحالة ربما كان له الحق أن نشك هل يوجد من الترتيبات بمقدار ما يوجد من الأصليات . بالطبع إذا كانت جميع الأصليات تكوّن متسلسلة محكمة الترتيب ، فيجب أن يوجد ترتيبى لكل أصلى . ولكن مع أن كانتور يقول بأن عنده برهاناً على أنه إذا اختلف عددان أصليان ، فأحدهما لا بد أن يكون هو الأكبر (Math.Annalen XLVI, §2) فلا أستطيع إقناع نفسى أنه لم يفعل أكثر من أنه أثبت وجود متسلسلة حدودها أصليات ، أى واحد منها أكبر أو أصغر من أى واحد آخر . أما أن جميع الأصليات موجودة فى هذه المتسلسلة فلست أرى سبباً للاعتقاد فى ذلك . فربما وجد

---

(١) انظر الباب الثانى والثلاثين .

(٢) فيما يختص بالترتيبى الأعلى انظر Burali Forti, "Una question sui numeri transfiniti" Rendiconti del circolo matematico di Palermo 1897، وانظر كذلك مقالتى فى مجلة R d M. Vol. VIII. p. 43 note

(٣) انظر الباب الثامن والثلاثين بند ٣٠١

فصلان ، بحيث لا يمكن إجراء ترابط بين أحدهما وبين جزء من الآخر . وفى هذه الحالة لن يكون العدد الأصلى فى أحد الفصلين مساوياً للعدد فى الآخر ولا أكبر ولا أصغر منه . ولو كانت جميع الحدود منتمية لمتسلسلة مفردة محكمة الترتيب لكان ذلك مستحيلا . فإن لم تكن فلا أستطيع أن أجد أى طريقة لبيان أن مثل هذه الحالة لا يمكن أن تنشأ، وبذلك يلوح أن البرهان الأول، على أنه لا يوجد أصلى لا يمكن أن يزاد عليه، قد انهار .

٣٤٦ — البرهان الثانى من البراهين المشار إليها سابقاً [١] مختلف تمام الاختلاف وأكثر تحديداً . والبرهان فى حد ذاته طريف وهام وسنعطى مجملا عنه . تشتمل المقالة التى ظهر فيها هذا البرهان على نقاط ثلاث (١) برهان بسيط على وجود قوى أعلى من القوة الأولى (٢) الإشارة إلى أن هذه الطريقة فى البرهان يمكن أن تنطبق على أى قوة (٣) تطبيق الطريقة لإثبات وجود قوى أعلى من قوة المتواصل . ولنبدأ بفحص أول هذه النقاط ، ثم ننظر أهذه الطريقة عامة حقاً .

يقول كانتور : ليكن م ، و خاصتين متباعدتين فيما بينهما ، واعتبر مجموعة م من عناصر هـ حيث كل عنصر فى هـ مجموعة معدودة $\text{س}_{١}$ ، $\text{س}_{٢}$ .... ، $\text{س}_{\text{ن}}$ ، وكل س إما أنه أحد م أو أحد و (الخاصتان م، و يمكن اعتبارهما على التوالى أكبر وأصغر من حد مّا ثابت . هكذا يمكن أن تكون السينات أعداداً منطقة يكون كل منها أحد م عند ما تكون أكبر من ١ ، وأحد و عند ما تكون أصغر من ١ . وهذه الملاحظات لا محل لها منطقياً، ولكنها تيسر متابعة الحجة) . والمجموعة م تتكون من جميع العناصر الممكنة فى هـ من الوصف المتقدم الذكر ، عندئذ م غير معدودة ، أى من قوة أعلى من الأولى ، ولنأخذ أى مجموعة معدودة من الهاءات معرفة كما يأتى

$$\text{هـ}_{١} = (\text{ا}_{١١} ، \text{ا}_{٢١} .... \text{ا}_{١\text{ن}} ، ....)$$

$$\text{هـ}_{٢} = (\text{ا}_{١٢} ، \text{ا}_{٢٢} .... \text{ا}_{٢\text{ن}} ، ....)$$

$$\text{هـ}_{\text{ن}} = (\text{ا}_{\text{ن}١} ، \text{ا}_{\text{ن}٢} .... \text{ا}_{\text{ن}\text{ن}} ، ....)$$

---

(١) gahresbericht der deutschen Mathematiker — Vereinigung, I. (1892(p. 77.

(٢) القوة مرادفة للعدد الأصلى : القوة الأولى هى قوة الأعداد الصحيحة المتناهية ا .

حيث الألفات كل منها أحد م أو أحد و بطريقة معينة مّا (مثال ذلك أن الحدود الأولى التى عددها ن فى هـ ن قد تكون ميمات والباقى جميعاً واوات . أو قد يمكن اقتراح أى قانون آخر يضمن أن تكون الهاءات فى متسلسلتنا مختلفة جميعاً) عندئذ مهما تكن طريقة اختيار متسلسلة الهاءات ، نستطيع دائماً أن نجد حداً هـ. ينتمى للمجموعة م ولكن لا ينتمى إلى متسلسلات الهاءات المعدودة . وليكن هـ. المتسلسلة (ب ١ ، ب ٢ ، .... ب ن ، . . .) حيث لكل ن تكون ب ن مختلفة عن ا ن ن — أى إذا كانت ا ن ن أحد م كانت ب ن أحد و ، والعكس بالعكس . عندئذ كل واحدة من متسلسلاتنا المعدودة من الهاءات تشتمل على الأقل على حد واحد ليس متطابقاً مع الحد المناظر فى هـ. وعلى ذلك هـ . ليس أى واحد من حدود متسلسلتنا المعدودة من الهاءات . إذن لا متسلسلة من هذا النوع يمكن أن تحوى جميع الهاءات . وعلى ذلك الهاءات غير معدودة . أى م لها قوة أعلى من القوة الأولى .

ولا حاجة بنا إلى التوقف لفحص البرهان على أن هناك قوة أعلى من قوة المتواصل مما يسهل الحصول عليه من البرهان السابق الذكر . وربما شرعنا تواً فى النظر فى البرهان العام وهو : إذا عُلمت أى مجموعة أيا كانت فهناك مجموعة من قوة أعلى . هذا البرهان يبلغ من البساطة مبلغ برهان الحالة الخاصة ، ويجرى كالآتى : ليكن ى أى فصل ، واعتبر ك فصل علاقات بحيث أنه إذا كانت ع علاقة من هذا الفصل فكل حد من الفصل ى له العلاقة ع إما مع ٠ وإما مع ١ (أى زوج آخر من الحدود يصلح مثل ٠ ، ١) . إذن الفصل ك له قوة أعلى من الفصل ى . ولكى نثبت ذلك فلنلاحظ قبل كل شىء أن ك ليس له بكل تأكيد قوة دنيا ، لأنه إذا كان س أى ى ، ستكون هناك علاقة ع من الفصل ك بحيث أن كل ى ما عدا س له العلاقة ع مع ٠ ، ولكن س له هذه العلاقة مع ١ . والعلاقات التى هى من هذا النوع تكوّن لقيم س المتعددة فصلا له ترابط واحد بواحد مع حدود ى ، ومحوياً فى الفصل ك . إذن ك له على الأقل نفس القوة مثل ى . وللبرهنة على أن ك له قوة أكبر اعتبر أى فصل محوى فى ك ، وله ترابط واحد بواحد مع ى . عندئذ أى علاقة من هذا الفصل قد تسمى ع س ، حيث س بعض ى — والرمز اللاحق س

يدل على ترابط مع سَ . ولنشرع الآن فى تعريف العلاقة عَ بالشروط التالية : لكل حد سَ من ى له مع س علاقة عس مع ٠ ، لتكن سَ تأخذ العلاقة عَ مع ١ ولكل حد صَ من ى له مع صَ علاقة عص مع ١ ، لتكن صَ تأخذ العلاقة عَ مع ٠ ؛ إذن عَ تكون معرفةً لجميع حدود ى ، وهى علاقة من الفصل ك ، ولكنها ليست أى واحدة من العلاقات عس ٠ وعلى ذلك مهما يكن الفصل الذى نأخذه والمحوى فى ك ومن نفس قوة ى ، فهناك دائماً حد فى ك لا ينتمى لهذا الفصل . وإذن ك له قوة أعلى من ى .

٣٤٧ – ولنبدأ بتبسيط هذه الحجة بعض الشيء بحذف ذكر ٠ ، ١ ، والعلاقات معهما . تعرف كل علاقة من علاقات الفصل ك عند ما نعرف أى حدود ى لها هذه العلاقة مع ٠ . وبعبارة أخرى تعرف بواسطة فصل محوى فى ى (بما فى ذلك الفصل الصفرى ى ذاتها) . وهكذا هناك علاقة واحدة من الفصل ك لكل فصل محوى فى ى ، وعدد ك هو نفس العدد كالفصول المحوية فى ى . وعلى ذلك إذا كان ك أى فصل كان فحاصل الضرب المنطقى ك ى عبارة عن فصل محوى فى ى ، وعدد ك هو عدد كى حيث ك متغير قد يكون أى فصل . وبذلك تُرَد الحجة إلى ما يأتى : أن عدد الفصول المحوية فى أى فصل تزيد على عدد الحدود التى تنتمى إلى الفصل[1] .

وصورة أخرى من نفس الحجة تجرى كما يأتى : خذ أى علاقة ع لها الخاصتان (١) أن ميدانها الذى نسميه عمساو لعكس ميدانها ، (٢) أنه لا حدين من الميدان لهما بالضبط نفس المجموعة من المتعلقات . ثم بواسطة ع أى حد من ء فهو الترابط مع فصل محوى فى ء هو فصل المتعلقات التى يكون هذا الحد المذكور متعلقاً به . وهذا الترابط هو ترابط واحد بواحد . وعلينا أن نبين أنه يوجد على الأقل فصل واحد محوى فى ء ومحذوف فى هذا الترابط . والفصل المحذوف هو الفصل و الذى يتكون من جميع حدود الميدان . وهى الحدود التى ليست لها العلاقة ع مع نفسها . بعبارة أخرى الفصل و الذى هو ميدان حاصل الضرب المنطقى

---

(١) عدد الفصول المحوية فى فصل له ا من الأعضاء هو ٢ ا ؛ وبذلك تبين الحجة أن ٢ دائماً أكبر من ا .

ا ع والتعدد ، لأنه إذا كان ص أى حد من الميدان وبناء على ذلك من عكس الميدان ، كان ص ينتمى ا و إذا لم يكن ينتمى للفصل المترابط مع ص ، ولا ينتمى ا و فى الحالة المقابلة . وإذن و ليس نفس الفصل كالفصل المترابط مع ص. وهذا ينطبق على أى حد ص نختاره . على ذلك الفصل و محذوف بالضرورة فى الترابط .

٣٤٨ ـ ينبغى الاعتراف بأن الحجة السالفة يلوح أنها لا تشتمل على افتراض موضع نزاع . ومع ذلك هناك بعض الأحوال التى تظهر فيها النتيجة واضحة البطلان . ولنبدأ بفصل جميع الحدود . فإذا سلمنا ــ كما فعلنا فى بند ٤٧ ــ بأن كل مكوّن فى كل قضية حد ، لم تكن الفصول سوى بعض الحدود . وبالعكس ما دام يوجد لكل حد فصل يتكون من ذلك الحد فقط فهناك ترابط واحد بواحد بين جميع الحدود وبين بعض الفصول . إذن يجب أن يكون عدد الفصول هو نفس عدد الحدود [١] . هذه الحالة تلتقى فى توافق مع مذهب الأصناف [٢] ، وتكون بذلك شبيهة بالضبط لحالة الفصول وفصول الفصول . ولكن إذا سلمنا بفكرة جميع الأشياء [٣] من كل نوع ، أصبح من الواضح أن فصول الأشياء إنما يجب أن تكون بعضاً فقط من الأشياء ، على حين أن حجة كانتور تبين وجود فصول أكثر من الأشياء . أوخذ فصل القضايا ، فكل شيء يمكن أن يقع فى قضية ما ، ويلوح مما لا ريب فيه أن هناك على الأقل من القضايا بعدد ما يوجد من الأشياء . لأنه إذا كان ى فصلا ثابتاً ، كانت « س أحد ى » قضية مختلفة لكل قيمة مختلفة من س .

---

(١) ينتج هذا من نظرية شريدر و برنشتين التى بمقتضاها إذا كان ى شبيهاً بجزء من ف وكان ف شبيهاً بجزء من ى وجب أن يكون ى ، ف متشابهين . انظر Borel, *Leçons sur la Théorie des Fonctions* (Paris, 1898) p. 102

(٢) انظر الباب العاشر . والملحق ب .

(٣) انظر بند ٥٨ من الجزء الأول من هذا الكتاب – الهامش . (المترجم : سقط منا إثبات هذا الهامش فى الجزء الأول ، وهو الخاص بلفظة شيء object ، ولذلك ننقله فى هذا الموضع ، وكان من حقه أن يكون فى صفحة ١٠٥ من الطبعة العربية الجزء الأول) وهذا هو الهامش :

سأستخدم لفظة شيء object بمعنى أوسع من لفظة حد term بحيث يشمل كلا المفرد والجمع ، وكذلك بعض أحوال من اللبس مثل « رجل a man » . أما أن لفظة يمكن أن تصاغ بمعنى أوسع من « حد » فأمر يثير صعوبات منطقية عويصة – انظر بند ٤٧ .

وإذا سلمنا حسب مذهب الأصناف أنه إذا كان س له مع ى المعلوم مدى مقيد إنْ وجب أن تبقى « س هى أحد ى » ذات دلالة ، فليس علينا إلا أن نغيرّ ى تغييراً مناسباً للحصول على قضايا من هذا النوع لكل س ممكنة ، وبذلك يجب أن يكون عدد القضايا على الأقل كبيراً كعدد الأشياء . ولكن فصول القضايا إنما هى بعض الأشياء فقط ، ومع ذلك فحجة كانتور تبين أن هناك من الأشياء أكثر من القضايا . ثم نستطيع بسهولة إثبات وجود دوال قضايا أكثر من الأشياء . ولتفرض وقوع ترابط بين جميع الأشياء وبعض دوال القضايا . ولتكن φ س المترابطة مع س . إذن « لا — φ س (س) » . أى أن « φ س لا تصح على س » هى دالة قضية غير محوية فى الترابط . لأن س تكون صادقة أو كاذبة بحسب ما تكون φ س صحيحة أو كاذبة على س ، وإذن فهى مختلفة عن φ س لكل قيمة من س . ولكن هذه الحالة ربما تفسرها من بعض الوجوه مذهب الأصناف .

٣٤٩ — من المفيد أن نفحص بالتفصيل فى تطبيق حجة كانتور على مثل هذه الحالات بواسطة ترابط نحاوله بالفعل . ففى حالة الحدود والفصول مثلا ، إذا لم يكن س فصلا فلنجعله يترابط مع ط س . أى الفصل الذى عضوه الوحيد س ، أما إذا كان س فصلا . فلنجعله يترابط مع نفسه . (ليس هذا الترابط ترابط واحد بواحد بل كثير بواحد . لأن س . ط س كلاهما مترابطان مع ط س . ولكن هذا يعين على توضيح النقطة المذكورة) . ثم الفصل الذى يجب حسب حجة كانتور حذفه من الترابط هو الفصل و . وهو أحد تلك الفصول التى ليست عضاء نفسها ؛ ومع ذلك فهذا الفصل لأنه فصل فيجب أن يترابط مع نفسه . غير أن و فصل — كما رأينا فى الباب العاشر — متناقض مع نفسه self contradictory أى أنه عضو مع نفسه وليس عضواً مع نفسه فى آن واحد . ويمكن أن يحل التناقض فى هذه الحالة بمذهب الأصناف ؛ ولكن حالة القضايا أكثر صعوبة . وفى هذه الحالة فلنرابط كل فصل من القضايا بالقضية التى هى حاصل ضربها المنطقى ؛ وبهذا السبيل يلوح أننا نحصل على علاقة واحد بواحد لجميع فصول القضايا مع بعض القضايا . ولكن بتطبيق حجة كانتور نجد أننا قد حذفنا الفصل و من تلك القضايا التى هى حواصل ضرب منطقى ، ولكنها ليست أعضاء فى فصول القضايا التى هى

حواصل ضربها المنطق . وهذا الفصل بحسب تعريفنا للترابط يجب أن يكون مترابطاً مع حاصل ضربه المنطق نفسه ، إلاأننا عند فحص هذا الحاصل المنطق نجد أنه على السواء عضو وليس عضواً فى الفصل و الذى هو حاصل ضربه المنطق .

وبذلك نرى أن تطبيق حجة كانتور على الحالات المشكوك فيها يفضى إلى متناقضات ، ولو أنى عجزت عن إيجاد أى نقطة تبدو فيها الحجة باطلة . والحل الوحيد الذى أقترحه هو التسليم بالنتيجة القائلة بعدم وجود عدد هو الأكبر وبمذهب الأصناف ، وعدم التسليم بوجود أى قضايا صوادق عن جميع الأشياء أو جميع القضايا . ومع ذلك فالأمر الأخير يبدو واضح البطلان ، ما دامت جميع القضايا على أى حال فهى صادقة أو كاذبة حتى إذا لم يكن لها أى خواص أخرى مشتركة . وبهذا الوضع غير المرضى أنفض المشكلة من يدى تاركاً إياها لفطنة القارئ .

٣٥٠ — نجمل الآن مناقشات هذا الجزء فنقول : رأينا أولاً أن اللامنطقات تعرف بأنها تلك القطع من المنطقات التى ليس لها نهاية ، وبهذا الطريق يستطيع التحليل الاستغناء عن أى بديهية خاصة عن الاتصال . ورأينا أنه من الممكن بطريقة ترتيبية بحتة تعريف نوع الاتصال الذى ينتمى للأعداد الحقيقية . وأن الاتصال معرفاً على هذا النحو ليس متناقضاً مع نفسه . ورأينا أن حساب التفاضل والتكامل فى غير حاجة إلى اللانهائى الصغر . وأنه مع أن بعض صور اللانهائى الصغر مقبولة ، إلا أن الصورة الأكثر شيوعاً وهى القطع اللانهائية الصغر فى متسلسلة ملتحمة لا يستلزمها الالتحام ولا الاتصال ، بل هى فى الواقع متناقضة مع نفسها . وناقشنا أخيراً المسائل الفلسفية المتعلقة بالاتصال واللانهاية ووجدنا أن حجج زينون ، ولو أنها صحيحة إلى حد كبير ، فإنها لا تثير أى نوع من الصعوبات العويصة . وبعد أن وضعنا أيدينا بوضوح على التعريف المزدوج للامتناهى ، من أنه ذلك الذى لا يمكن بلوغه بالاستنباط الرياضى بادئين من ١ ؛ ومن أنه ذلك الذى له أجزاء عدد حدودها هى نفس عددها — وهما تعريفان يمكن التمييز بينهما بأن أولهما ترتيبي والثانى أصلى — رأينا أن جميع الحجج المعتادة بالنسبة للانهاية وللاتصال على حد سواء باطلة ، وأنه لا يمكن البرهنة على أى تناقض معين

بالنسبة لأيهما ، ولو أن بعض الفصول اللانهائية المعينة تؤدى فعلاً إلى هذه التناقضات التى لم تحل حتى الآن .

بقى أن نطبق على المكان والزمان والحركة النتائج الثلاث الرئيسية الحاصلة عن هذه المناقشة وهى (١) استحالة القطع اللانهائية الصغر (٢) تعريف الاتصال (٣) تعريف اللامتناهى ومذهبه المتسق . هذه التطبيقات أرجو أن تقنع القارئ بأن المناقشات السالفة التى كانت طويلة بعض الشيء لم تكن فضلا زائداً عن الحاجة.

فهرس

الجزء الرابع

الترتيب

الجزء الخامس

اللانهاية والاتصال

تم طبع هذا الكتاب على مطابع
دار المعارف بمصر سنة ١٩٦١